

VISIT...

LANZAROTE  
*Caliente*.COM

В.Баадер, Е.Доне, М.Бренндерфер

# БИОГАЗ

теория и практика

Перевод с немецкого и предисловие  
инженера *М. И. Серебряного*



МОСКВА «КОЛОС» 1982

**Biogas in Theorie und Praxis****Behandlung organischer Reststoffe aus der Landwirtschaft**

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Baader  
Dipl.-Ing. Dr. Erich Dohne  
Dipl.-Ing. Michael Brenndörfer

Herausgeber  
Kuratorium für Technik und Bauwesen  
in der Landwirtschaft e. V. 6100 Darmstadt-Krönichstein

Баадер В., Доне Е., Бренндерфер М. **Биогаз: теория и практика** (Пер. с нем. и предисловие М. И. Серебряного.) — М. Колос, 1982 — 148 с.

Рациональное использование отходов сельскохозяйственного производства — большая и важная проблема современности. Она связана с одной стороны, с возможностью использования огромного энергетического потенциала биомассы для получения жидкого и газообразного топлива (биогаза), с другой — с необходимостью предотвратить загрязнение водоемов, заражение почвы болезнетворными бактериями и гельминтами, содержащимися в навозных стоках животноводческих ферм. Оба эти аспекта стали объектом исследований и экспериментов как в зарубежных странах, так и в Советском Союзе; с каждым годом растет число действующих биогазовых установок, в особенности в странах с теплым и жарким климатом. В книге обобщен опыт исследований и эксплуатации биогазовых установок за последние 20 лет в ФРГ и других странах. Авторы охватывают важнейшие проблемы, связанные с теорией метанового брожения, технологическими приемами получения биогаза и его использования. Определенный интерес представляет методика оценки экономичности биогазовых установок в условиях сельскохозяйственных предприятий с учетом комплексного использования биогаза для энергетических целей и удобрений в полеводстве.

Иллюстраций 36, таблиц 35, список литературы — 150 названий.

Рекомендована к изданию Всесоюзным научно-исследовательским институтом электрификации сельского хозяйства

**ПРЕДИСЛОВИЕ К РУССКОМУ ИЗДАНИЮ**

Последняя треть XX века характеризуется невиданными темпами роста производительных сил в большинстве стран мира, что привело к резкому увеличению потребления всех видов энергии, в особенности заключенной в ископаемом топливе — угле, нефти и природном газе. В результате этого в ряде стран стала ощущаться нехватка традиционных видов топлива, главным образом такого универсального и удобного, как нефть. Энергетический кризис, захвативший многие капиталистические государства, вызвал огромный рост цены на нефть, превышающей в настоящее время 200 долл. за тонну. Создавшаяся ситуация усилила стремление поставить на службу человеку так называемые нетрадиционные источники энергии — солнечную, ветровую, геотермальную.

Хотя солнечная энергия представляет собой практически неисчерпаемый источник и могла бы удовлетворить энергетические потребности всего населения земли на многие века, ее непосредственное применение связано с большими трудностями.

Другой путь — сегодня более перспективный — использовать солнечную энергию, запасенную в биомассе в результате фотосинтезной деятельности растений, для получения жидкого и газообразного топлива. Этому пути уделяется сейчас большое внимание как в промышленно развитых, так и в развивающихся странах. Доля биомассы в энергопотреблении разных стран колеблется в широких пределах. Если в США, например, она еще совсем невелика (~2,5%), то в некоторых развивающихся странах биомасса служит основным источником энергии для отопления жилищ и приготовления пищи.

Наиболее распространенный способ получения энергии из биомассы — анаэробное (без доступа кислорода) сбраживание отходов сельскохозяйственного производства. Получающиеся в результате этого процесса продукты — биогаз и перебродившая полужидкая масса — представляют собой большую ценность как газообразное топливо и органическое удобрение.

Не менее важная сторона применения биогазовых установок — предотвращение загрязнения воздушного и водного бассейнов, почвы и посевов благодаря утилизации и дезодорации навозных стоков крупных животноводческих ферм и комплексов, получению обеззараженных высокоэффективных органических удобрений.

Все это объясняет большой интерес, проявляемый советской наукой к проблеме метанового сбраживания навозных стоков и других органических отходов. В СССР научно-исследовательские и экспериментальные работы по этой теме велись в таких научных учреждениях, как ГрузНИИМЭСХ, Институт физики АН Молдавской ССР, в Запорожском филиале ВИЭСХа и др. Так, на острове Хортица учеными и специалистами Запорожского филиала ВИЭСХа (ныне ЦНИПТИМЭЖ) еще в 1959 г. была сооружена биогазовая установка, рассчитанная на переработку навоза от 150 коров и 20 свиноматок с поросятами. Помимо самой установки, в которую входили бродильные камеры, газгольдер и хранилище для перебродившей массы (шлама), были построены насосная станция для перекачки шлама на поля и электростанция, работающая на биогазе. Десятилетняя эксплуатация установки, включавшая в себя эксперименты по подбору наилучшего состава биомассы и оптимальных режимов брожения, необходимых для получения биогаза, по обеззараживанию навоза, изучению удобрительных свойств получаемого шлама, дала положительные результаты и послужила основой для разработки ряда проектов биогазовых установок для ферм и комплексов с различным поголовьем скота.

Необходимость в развитии нетрадиционных источников энергии, создании новых энергосберегающих технологий, подчеркнутая в решениях XXVI съезда КПСС, проблема обеззараживания и утилизации огромных масс навозных стоков животноводческих ферм и комплексов, имеющая важнейшее природоохранное значение, требуют усиления внимания к современным способам перера-

ботки органических отходов. С этой точки зрения предлагаемая читателю книга западногерманских ученых, обобщающая опыт исследований и эксплуатации биогазовых установок в ФРГ и других западных странах за два последних десятилетия, может принести немалую пользу советским специалистам, работающим в данной области. Кроме основ теории метанового брожения, технологических приемов получения биогаза и его использования в сельском хозяйстве, книга содержит экономический анализ производства биогаза и эксплуатации биогазовых установок. Хотя данные этого анализа относятся к условиям частных предприятий и, естественно, не могут непосредственно быть использованы в нашей практике, методика расчетов и некоторые относительные показатели представляют определенный интерес, так как рентабельность эксплуатации биогазовых установок — многосторонняя проблема, имеющая определяющее значение при решении вопроса о сооружении таких установок в условиях конкретных регионов нашей страны.

В списке литературы по тематике книги приводится 150 названий работ авторов из ФРГ и других западных стран за период, оканчивающийся 1977 г. Читателям, интересующимся этой проблемой, рекомендуем обратиться к следующим статьям советских ученых и специалистов, опубликованным в журнале «Механизация и электрификация сельского хозяйства»: П. Н. Листов, Л. Г. Прищеп и П. А. Кучер «Эффективное использование навоза в сельском хозяйстве» — № 1 за 1976 г., с. 21; А. Н. Хитров «Сельскохозяйственная биомасса как источник энергии» — № 4 за 1980 г., с. 57; И. Г. Васильева «Энергетический потенциал отходов сельскохозяйственного производства» — № 7 за 1981 г., с. 57. Кроме того, в последнем из перечисленных номеров журнала приводится аннотированный список зарубежной литературы по биогазу и биогазовым установкам, опубликованной в 1979 ... 1980 гг.

*М. И. Серебряный*

## ПРЕДИСЛОВИЕ К НЕМЕЦКОМУ ИЗДАНИЮ

Уже в 1947 г. в ФРГ началась интенсивная исследовательская работа в области метанового сбраживания органических отходов сельскохозяйственного производства. Используя фундаментальные труды немецких и зарубежных ученых по микробиологии метанового брожения, целенаправленные лабораторные исследования и опыт эксплуатации многочисленных экспериментальных установок разных систем, построенных за короткий срок, удалось получить необходимые сведения о протекании процесса, условиях его эффективности и, исходя из этого, важные данные для определения параметров и конструирования биогазовых установок. Кураториум по технике и строительству в сельском хозяйстве ФРГ (KTBL) активно поддерживал все эти начинания и обеспечивал необходимую базу для научной работы. Однако благоприятная конъюнктура отпускных цен на энергию в конце 50-х годов привела не только к прекращению активных исследований и практических разработок в рассматриваемой области, но и к «замораживанию» почти всех биогазовых установок. Лишь одна установка из действовавших в тот период еще находится в эксплуатации.

Новые стимулы к решению упомянутой проблемы появились в течение последних четырех лет в связи с развитием мировой экономики в сферах энергетики, сырья и охраны окружающей среды. В открытой дискуссии о возможностях получения энергии из источников, которые до сих пор совсем не использовались или использовались лишь в незначительной мере, биогазу стало придаваться большое значение. Значимость его увеличилась еще и потому, что на основе данных о годовом объеме сельскохозяйственных органических отходов бы-

ли сделаны весьма оптимистические прогнозы о количестве энергии, которое можно получить из этих отходов, превращая их в биогаз. Однако при этом недостаточно учитывали то обстоятельство, что эти отходы различаются между собой не только по виду, составу и состоянию, чем оказывают очень сильное влияние на выход газа, но и (в особенности отходы растениеводства) то, что они поступают в различное время из разных мест и большей частью с неодинаковыми качественными и количественными характеристиками.

На затраты труда и денежных средств, которые необходимы, чтобы превратить органические отходы в субстрат для получения газа биологическим способом, обращали так же мало внимания, как и на повышенные затраты, связанные с иссяканием содержащегося в этих отходах энергетического потенциала.

Промежуточный баланс, подведенный на совещании Кураториума 10 марта 1974 г., вновь указал на узкие границы, в пределах которых и в наши дни возможно экономичное использование биогазового метода в сельском хозяйстве ФРГ. Наше исследование дополняет и подкрепляет полученные к тому времени выводы. С учетом уровня научных данных, имевшихся в немецкой и зарубежной специальной литературе, в первой части книги даны рекомендации по технологии упомянутого метода, в особенности в отношении факторов и взаимосвязей, характеризующих процесс получения газа, и по определяемым ими предпосылкам для выработки биогаза из растительных остатков и отходов сельскохозяйственного производства. Во второй части приведены данные о возможностях использования биогаза в сельском хозяйстве и связанные с этим технические и экономические вопросы производства. Материалы публикуемого обзора должны облегчить оценку биогазового метода в его различных вариантах как средства для утилизации растительных отходов, благоприятного с точки зрения защиты окружающей среды, а также как источника энергии, позволяющего экономить затраты энергоносителей, которые поступают в сельскохозяйственное производство извне.

Исследование представляет собой результат совместной работы Научно-исследовательского института по сельскохозяйственным машинам Федерального центра сельскохозяйственных исследований, Брауншвейг-Фель-

кенроде (в технологической области, ч. I) и КТБЛ Дармштадт (в производственно-технической и экономической областях, ч. II). Авторы приносят большую благодарность г-ну д-ру Титьену из Научно-исследовательского института растениеводства и семеноводства Федерального центра сельскохозяйственных исследований и г-ну д-ру Лоллю из Института водоснабжения, утилизации сточных вод и землеустройства Технического университета Дармштадт за критический разбор рукописи и многочисленные ценные указания.

Упомянутые или рассмотренные в данной работе литературные источники представляют собой лишь часть немецких и зарубежных публикаций на эту тему. Однако от исчерпывающего указателя литературы по биогазовой технологии мы отказались, поскольку он должен вскоре быть выпущен документационным центром «Сельскохозяйственная техника».

Председатель рабочей комиссии КТБЛ  
«Сельскохозяйственная техника и защита  
окружающей среды»  
проф. д-р-инж. В. Баадер  
Апрель 1978 г.

## ВВЕДЕНИЕ

К органическим остаткам и отходам сельскохозяйственного производства относятся главным образом экскременты животных и растительные материалы, в особенности солома, а также свекольная и картофельная ботва и другие растительные остатки, если они не используются непосредственно в качестве корма. Содержащиеся в этих органических материалах компоненты в большинстве случаев могут быть вновь использованы как растительные удобрения, что позволит таким образом заменять минеральные удобрения, требующие больших затрат энергии и средств. Благодаря относительно высокой теплоте сгорания (табл. 1) эти материалы обладают также энергетическим потенциалом, который может быть использован различными способами. Один из них — производство газа (биогаза) с высоким содержанием энергии путем анаэробного сбраживания.

Данные о ежегодном количестве экскрементов животных, получаемом в сельском хозяйстве ФРГ, приво-

Таблица 1. Теплота сгорания различных органических материалов и видов топлива

| Органические отходы                 | Доля органической массы в общей массе сухого вещества, % | Теплота сгорания $Q_H$ , МДж на 1 кг сухого вещества |
|-------------------------------------|----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| Отходы растительного происхождения  | 95...98                                                  | 16...19                                              |
| Экскременты крупного рогатого скота | 77                                                       | 18...19                                              |
| Экскременты свиней                  | 80                                                       | 18...19                                              |
| » кур                               | 77                                                       | 14...16                                              |

Продолжение

| Вид топлива                                  | Источник получения                                                   | Теплота сгорания $Q_B$ ,<br>МДж/м³ |
|----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|------------------------------------|
| Биогас                                       | Экскременты животных с добавлением растительных остатков или без них | 20...25                            |
| Генераторный газ                             | Дерево, солома                                                       | 5...7                              |
| Пиролизный газ                               | Экскременты животных                                                 | 18...20                            |
| Светильный газ                               |                                                                      | 18...20                            |
| Природный газ                                |                                                                      | 33...38                            |
| Метан                                        |                                                                      | 36                                 |
| Пропан (газообразный)                        |                                                                      | 93                                 |
| Дизельное топливо, котельное топливо, бензин |                                                                      | 41...45 МДж/кг                     |
| Пропан (сжиженный)                           |                                                                      | 46                                 |
| Каменный уголь                               |                                                                      | 30...33                            |
| Дрова                                        |                                                                      | 14...19                            |

Таблица 2. Поголовье животных, выход и состав экскрементов (ФРГ, 1975 г.)

| Вид животных         | Поголовье* |                      | Выход экскрементов** *** и мочи |               |
|----------------------|------------|----------------------|---------------------------------|---------------|
|                      | млн.       | млн. усл. гол. скота | кг в сутки на 1 усл. гол.       | млн. т за год |
| Крупный рогатый скот | 14,493     | 10,014               | 45                              | 164,48        |
| Свиньи               | 19,805     | 2,205                | 37                              | 29,78         |
| Куры                 | 88,705     | 0,365                | 50                              | 6,65          |

Продолжение

| Вид животных         | Процентное содержание во влажной массе ** *** |                      |       |                      |
|----------------------|-----------------------------------------------|----------------------|-------|----------------------|
|                      | сухого вещества                               | органических веществ | азота | фосфора ( $P_2O_5$ ) |
| Крупный рогатый скот | 11,0                                          | 9,0                  | 0,5   | 0,2                  |
| Свиньи               | 8,5                                           | 6,5                  | 0,8   | 0,4                  |
| Куры                 | 22,0                                          | 17,0                 | 1,3   | 1,0                  |

\* По [146].

\*\* По [9].

\*\*\* Для дойных коров, откармливаемых свиней, кур-несушек.

Таблица 3. Производство важнейших видов продукции растениеводства и количество соответствующих им отходов в ФРГ за 1975 г., тыс. т [146]

| Продукт         | Выход  | Количество отходов |        |                       |       |
|-----------------|--------|--------------------|--------|-----------------------|-------|
|                 |        | всего              |        | в том числе скормлено |       |
|                 |        | соломы             | ботвы  | соломы                | ботвы |
| Пшеница         | 7 014  | 11 433             |        |                       |       |
| Рожь            | 2 125  | 3 974              |        |                       |       |
| Ячмень          | 6 971  | 8 853              |        | 3 830                 |       |
| Смешанное зерно | 1 067  | 1 440              |        |                       |       |
| Овес            | 3 445  | 5 030              |        |                       |       |
| Кукуруза        | 531    | 797                |        |                       |       |
| Картофель       | 10 853 |                    | 4 341  |                       |       |
| Сахарная свекла | 18 203 |                    | 13 652 |                       | 8 990 |
| Кормовая свекла | 23 051 |                    | 6 224  |                       | 4 050 |

дятся в таблице 2, о количестве важнейших остатков и отходов растениеводства — в таблице 3.

Биологическое разложение преимущественно органических соединений, а также части легколетучих и резкопахнущих веществ, содержащихся прежде всего в свежих экскрементах животных, приводит к выделению газов и образованию запаха. Неорганические элементы в зависимости от их вида, состава, сроков и места поступления могут вызвать неблагоприятные последствия, например снижение урожайности и качества продукции растениеводства или загрязнение вод. Кроме того, наличие в отходах возбудителей болезней представляет собой потенциальную опасность для людей и животных.

Таким образом, подход к проблеме переработки отходов сельскохозяйственного производства должен базироваться прежде всего на требованиях защиты окружающей среды, куда входят:

- устранение эмиссии неприятных запахов при получении и хранении отходов;
- предотвращение контаминации продукции, заражения людей и животных возбудителями болезней;
- предотвращение перегрузки почвы, воды и растений вредными веществами.

При этом применение анаэробных методов сулит дополнительные преимущества с точки зрения производства сельскохозяйственной продукции и экономии энергии,

так как при известных условиях позволяет экономить покупные удобрения благодаря использованию удобрительных свойств продуктов сбраживания, а также первичную энергию путем реализации энергетического потенциала растительных отходов.

Те или иные цели процесса переработки отходов, определяемые требованиями охраны окружающей среды, могут быть достигнуты в результате использования как аэробного, так и анаэробного способа брожения. Решающие факторы при выборе конкретного способа:

- первоначальные и эксплуатационные расходы;
- надежность в эксплуатации;
- требования к техническому обслуживанию и эксплуатации;
- эффективность использования получаемой продукции.

Если исходный материал находится в жидком состоянии, то анаэробный способ брожения предпочтительнее в смысле эксплуатационных расходов, поскольку потребность в энергии для отдельных этапов процесса (например, подогрева) может быть покрыта за счет полученного газа и при соответствующем ведении процесса возможно дополнительное снижение затрат благодаря полезному использованию избыточного количества газа. Еще одним преимуществом анаэробного сбраживания можно считать повышенное содержание азота в конечном субстрате, что важно для питания растений (при аэробном сбраживании потери азота достигают 40%).

Таким образом, для сельскохозяйственного производства анаэробный способ представляет собой альтернативу аэробному, поскольку первый связан с относительно малыми затратами энергии и небольшими потерями азота.

В каком объеме и с какими затратами можно получить при этом из излишков газа дополнительную полезную энергию для сельскохозяйственного производства или даже для сторонних потребителей, зависит от большого числа технологических, производственно-технических и экономических факторов.

## ТЕХНОЛОГИЯ МЕТАНОВОГО БРОЖЕНИЯ

В. БААДЕР

### 1. Основные положения

#### 1.1. Особенности процесса

##### 1.1.1. Процессы биохимических превращений [15, 17, 18, 58, 60, 91]

На первом этапе анаэробного сбраживания органических веществ путем биохимического расщепления (гидролиза) сначала происходит разложение высокомолекулярных соединений (углеводов, жиров, белковых веществ) на низкомолекулярные органические соединения. На втором этапе при участии кислотообразующих бактерий происходит дальнейшее разложение с образованием органических кислот и их солей, а также спиртов,  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2$ , а затем  $\text{H}_2\text{S}$  и  $\text{NH}_3$ . Окончательное бактериальное преобразование органических веществ в  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  осуществляется на третьем этапе процесса (метановое брожение). Кроме того, из  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2$  образуется

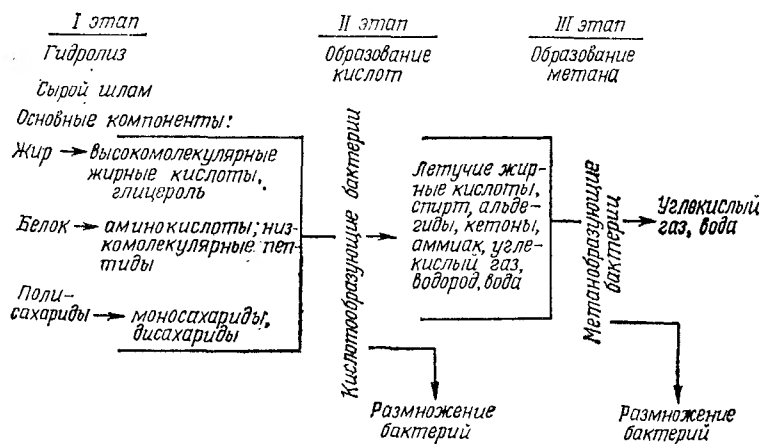


Рис. 1. Этапы процесса анаэробного брожения [44].



в дальнейшем дополнительное количество  $\text{CH}_4$  и  $\text{H}_2\text{O}$  (рис. 1).

Эти реакции протекают одновременно, причем метанообразующие бактерии предъявляют к условиям своего существования значительно более высокие требования, чем кислотообразующие. Так, например, они нуждаются в абсолютно анаэробной среде и требуют более длительного времени для воспроизводства. Скорость и масштабы анаэробного брожения метанообразующих бактерий зависят от их метаболической активности.

### 1.1.2. Факторы, влияющие на процесс брожения

Температура [16, 19, 22, 27, 63, 91, 125]

Метаболическая активность и репродуктивная способность микроорганизмов находятся в функциональной зависимости от температуры. Таким образом, температура влияет на объем газа, который можно получить из определенного количества органического вещества в течение заданного времени, а также на технологическое время процесса брожения, необходимое для высвобождения при соответствующей температуре определенного количества газа (рис. 2).

В многочисленных более ранних работах названы два температурных предела

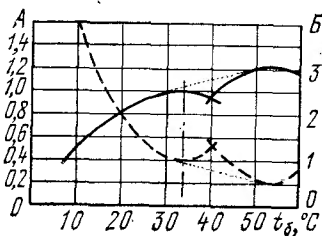


Рис. 2. Отношения количеств (А, сплошные линии) газа, выделяемого при различных температурах бродильной камеры, и необходимой для этого длительности (Б, штриховые линии) брожения к соответствующим значениям этих же величин при  $33^\circ\text{C}$ .

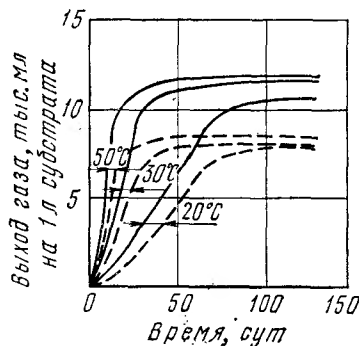


Рис. 3. Влияние температуры брожения и продолжительности процесса брожения на выход и состав получаемого газа [63] (сплошные линии — общий выход газа, штриховые — выход метана).

(около  $33^\circ$  и  $54^\circ\text{C}$ ), которым соответствуют наивысшие значения метаболической активности. Прерывистый характер протекания функции объясняется заменой мезофильного штамма бактерий на термофильный. Однако, согласно новейшим исследованиям, такая прерывистость не существует, а это означает, что с повышением температуры примерно до  $54^\circ\text{C}$  [62] условия для образования газа улучшаются. Микробиологическая активность почти прекращается, если температура падает примерно до  $15^\circ$ . К перепадам температуры, в особенности к ее внезапным понижениям, микроорганизмы весьма чувствительны и реагируют на это снижением метаболической активности и способности к воспроизведению.

Кроме того, температура влияет на качество газа. Так, при возрастании температуры было установлено снижение доли  $\text{CH}_4$  в общем объеме выделяющихся газов (рис. 3).

Содержание кислот, pH, буферные свойства (щелочность) [50, 54, 58, 71]

Так как метаболическая активность и уровень воспроизводства метановых бактерий ниже, чем кислотообразующих, при нарастании количества образующихся органических веществ может получиться избыток летучих кислот, который снижает активность метановых бактерий, как только значение pH опустится ниже 6,5. Обычно величина pH благодаря буферным свойствам субстрата при неравномерном образовании кислот поддерживается на постоянном уровне. Эти свойства проявляются путем образования карбонатов в количествах, превышающих количество выделившегося при брожении  $\text{CO}_2$ .

В качестве оптимальных значений могут быть названы:

- щелочность 1500...5000 мг  $\text{CaCO}_3$  на 1 л субстрата;
- pH 6,5...7,5;
- содержание летучих кислот 600...1500 мг на 1 л субстрата.

Признаки нарушения процесса анаэробного сбраживания:

- снижение щелочности;
- уменьшение величины pH;

- возрастание содержания летучих кислот;
- увеличение доли  $\text{CO}_2$  в выделяющемся газе;
- снижение выхода газа.

Ингибиторы [45, 58, 59, 64, 66, 69, 71, 134].

К веществам, которые в слишком большой концентрации препятствуют жизнедеятельности микроорганизмов, относятся прежде всего тяжелые металлы и их соли, щелочные металлы, щелочноземельные металлы, аммиак, нитраты, сульфиды, детергенты, органические растворители, антибиотики.

Таблица 4. Предельные концентрации веществ, препятствующих процессу метанового брожения

|          | Концентрация, мг на 1 л субстрата | Литературный источник |
|----------|-----------------------------------|-----------------------|
| Медь     | 10                                | [69]                  |
| Кальций  | 8000                              | [66]                  |
| Натрий   |                                   |                       |
| Калий    |                                   |                       |
| Магний   | 3000                              |                       |
| Аммиак   | 1500                              | [45]                  |
| Сульфиды | 200 (как сера)                    | [66]                  |
| Нитраты  | 50                                | [59]                  |

Примечание. Дополнительные данные в [134], стр. 26 и 71.

В таблице 4 для некоторых веществ приведены значения концентрации, которые ведут к существенному замедлению метанообразования. Для детергентов, органических растворителей и антибиотиков не имеется точных данных о критических значениях концентрации. Однако в литературе указывается, что эти вещества даже в самых незначительных количествах препятствуют процессу брожения.

Питательная среда [17, 65, 86, 91]

Предпосылкой беспрепятственного размножения бактерий служит наличие питательной среды, которая содержит как углерод и кислород для обеспечения этого процесса энергией, водород, азот, серу и фосфор — для образования белка, так и щелочные металлы, железо и микроэлементы.

При этом активность микробной реакции в значительной мере определяется соотношением углерода и азота. Наиболее благоприятные условия соответствуют значениям  $\text{C/N} = 10 \dots 16$ .

Если в исходном субстрате углеводов больше, чем белковых веществ, то образуется мало аммонийного азота. Вследствие этого выделяется меньше  $\text{CH}_4$  и больше  $\text{H}_2$  и  $\text{CO}_2$ , что ведет к увеличению выхода кислот, снижению pH и тем самым к дальнейшему уменьшению интенсивности метанового брожения. С другой стороны, избыток белка и аминокислот обуславливает возрастание значения pH более 8, что также приводит к затуханию процесса метанообразования.

Состав газа [17, 65, 86, 91]

Количество и состав газа, образующегося в результате полного разложения органического вещества, зависит от соотношения  $\text{C:H:O:N}$  в исходном материале и от температуры процесса брожения. Из важнейших соединений, входящих в состав органического вещества, жиры обуславливают наибольший выход газа с высоким содержанием  $\text{CH}_4$ , белковые вещества — немного меньший, но тоже с высоким содержанием  $\text{CH}_4$ , и углеводов — относительно мало газа с наименьшим содержанием  $\text{CH}_4$ .

Средний состав газа, который можно получить из экскрементов животных при оптимальной температуре брожения  $34^\circ\text{C}$  соответствует соотношению  $\text{CH}_4/\text{CO}_2 = 2$ .

Концентрация твердых частиц [45, 58, 124, 143]

Предпосылкой высокой интенсивности реакции служит беспрепятственный обмен веществ на граничных поверхностях фаз, который должен поддерживаться непрерывным обновлением этих поверхностей благодаря перемешиванию субстрата. Однако это можно обеспечить только в том случае, если вязкость субстрата допускает свободу перемещения жидкости, взвешенных твердых частиц, в особенности бактерий, и пузырьков газа. Верхняя граница концентрации твердых частиц, при которой еще возможно свободное перемещение фаз, для субстрата с мелкодисперсной взвесью твердых веществ соответствует  $10 \dots 12\%$ . При больших значениях выход

газа значительно уменьшается. Путем интенсивного перемешивания и соответствующего подвода энергии нежелательный эффект можно существенно ограничить.

## 1.2. Влияние исходного материала на выход газа

### 1.2.1. Состав исходного материала

Среди остатков и отходов сельскохозяйственного производства наиболее богаты необходимыми для метанового брожения питательными веществами экскременты животных. Однако они очень различаются между собой как по наличию отдельных компонентов (рис. 4), так и

| Источник поступления                                                                                    | Скорость разложения в процессе брожения                                    |                                           |                                                                                                             |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                         | <div> <div>большая</div> <div>←</div> <div>→</div> <div>малая</div> </div> |                                           |                                                                                                             |
| Корм                                                                                                    | Крахмал, сахар<br>Гликоген                                                 | Целлюлоза<br>Гемицеллюлоза                | Лигнин<br>(одревесневший материал)                                                                          |
|                                                                                                         | Жирные кислоты<br>Белок, пептиды<br>Аминокислоты                           | Пентозаны<br>Пектин<br>Хитин              | Целлюлоза с лигнинной коркой (солома)<br>Кератин (волосы)<br>Кутины<br>Суберин (пробковое вещество)<br>Воск |
|                                                                                                         | Витамины<br>Антибиотики                                                    | Жиры<br>Масла                             |                                                                                                             |
| Организм животного                                                                                      | Слизь, кровь<br>Соматические клетки<br>Ферменты                            | Желчные кислоты                           | Желчные пигменты                                                                                            |
| Микрофлора                                                                                              | Гормоны<br>Биомасса                                                        |                                           |                                                                                                             |
| Промежуточные, конечные и химосинтетические производные продукты метаболизма животных и микроорганизмов | Органические кислоты<br>Спирт                                              | Индол<br>Скатол<br>Фенолы<br>Полисахариды | Лигнино-протеиновые комплексы<br>Гуминовые вещества                                                         |

Рис. 4. Содержание в экскрементах животных органических соединений, определяющих протекание процесса брожения.

Таблица 5. Состав экскрементов животных (в % к сухому веществу)

| Компонент                   | Экскременты                          |              |             |             |
|-----------------------------|--------------------------------------|--------------|-------------|-------------|
|                             | крупного рогатого скота (на откорме) | дойных коров | свиней      | кур         |
| Органическая масса          | 77...85                              | 77...85      | 77...84     | 76...77     |
| Азот                        | 2,3...4,0                            | 1,9...6,5    | 4,0...10,3  | 2,3...5,7   |
| Фосфор                      | 0,4...1,1                            | 0,2...0,7    | 1,9...2,5   | 1,0...2,7   |
| Калий                       | 1,0...2,0                            | 2,4          | 1,4...3,1   | 1,0...2,9   |
| Кальций                     | 0,6...1,4                            | 2,3...4,9    |             | 5,6...11,6  |
| Магний                      | 0,5...0,6                            |              |             | 0,9...1,1   |
| C/N                         | 9...15                               | 9...15       | 9...15      | 9...15      |
| Сырая клетчатка (целлюлоза) |                                      | 27,6...50,3  | 19,5...21,4 | 13,0...17,8 |
| Сырой жир                   |                                      | 2,9...4,3    | 3,5...4,0   | 2,4...5,0   |
| Сырой протеин               |                                      | 9,3...20,7   | 16,4...21,5 | 20,5...42,1 |
| Лигнин                      | 16...30                              | 16...30      |             | 9,6...14,3  |

по химическому составу в зависимости от того, о каком виде животных идет речь и какой корм эти животные потребляют (табл. 5). Кроме того, отходы животноводства в зависимости от способа содержания животных могут включать в себя самые различные количества воды, подстилочного материала и остатков корма.

Если подвергаемый сбраживанию исходный субстрат содержит, кроме стойлового навоза, другие растительные остатки, следует обращать особое внимание на их состав (табл. 6). При этом прежде всего нужно учитывать характерное для определенных условий высокое содержание лигнина, который практически не разлагается микробами и, следовательно, не принимает участия в процессе газообразования. По этой причине выход газа из экскрементов жвачных животных, которые находятся в кормах с высоким содержанием сырой клетчатки, значительно меньше, чем из экскрементов кур и свиней. Хотя путем механического, химического или теплового воздействия лигнинные комплексы можно сделать доступными для биохимического разложения, связанные с этим расходы делают упомянутые методы неприемлемыми для сельскохозяйственного производства [45].

Таблица 6. Состав соломы зерновых, ботвы сахарной свеклы и картофеля (в % к сухому веществу) [76, 98, 120]

| Компонент                      | Ячменная<br>солома | Пшеничная<br>солома | Ржаная<br>солома | Овсяная<br>солома | Кукурузная<br>солома | Свекловичная<br>ботва | Картофель-<br>ная ботва |
|--------------------------------|--------------------|---------------------|------------------|-------------------|----------------------|-----------------------|-------------------------|
| Органическая<br>масса          | 93,8               | 91,4                | 95,4             | 93,0              | 91,7                 | 78,5                  | 78,9                    |
| Азот                           | 0,56               | 0,46                | 0,46             | 0,54              | 1,20                 | 2,00                  | 2,34                    |
| Фосфор                         | 0,08               | 0,09                | 0,12             | 0,19              | 0,11                 | 0,26                  | 0,20                    |
| Калий                          | 1,40               | 0,79                | 0,88             | 1,92              | 2,32                 | 3,57                  | 1,67                    |
| Кальций                        | 0,29               | 0,14                | 0,19             | 0,29              | 0,9                  | 1,10                  | 2,57                    |
| Магний                         | 0,10               | 0,07                | 0,15             | 0,09              | 0,30                 | 0,60                  | 0,83                    |
| C/N                            | 84                 | 90...165            | 89...150         | 70...150          | 30...65              | 18                    | 17                      |
| Сырая клетчатка<br>(целлюлоза) | 43,5               | 45,5                | 47,5             | 41,5              | 33,3                 | 11,5                  | 23,8                    |
| Сырой жир                      | 1,7                | 1,6                 | 1,5              | 1,9               | 1,7                  | 1,5                   | 3,2                     |
| Сырой протеин                  | 3,5                | 2,9                 | 2,9              | 3,4               | 7,5                  | 12,5                  | 14,6                    |
| Лигнин                         | 15...20            | 15...20             | 15...20          | 15...20           | 5,5                  | —                     | —                       |

Для сбраживания растительных материалов с высоким содержанием способных к разложению соединений углерода необходимо добавление богатых азотом веществ, например куриного помета или свиного навоза, чтобы получить соотношение C/N в пределах, требуемых для беспрепятственного протекания процесса брожения.

### 1.2.2. Размеры твердых частиц [89, 116, 124]

Активного обмена веществ и высокой скорости биохимических обменных процессов можно достигнуть, если поддерживать и непрерывно обновлять максимально возможную величину граничных поверхностей между твердой и жидкой фазами. Поэтому твердые материалы, в особенности растительного происхождения, должны быть предварительно подготовлены с помощью режущих, разрывающих или плющильных устройств, чтобы в результате эффективного механического воздействия на куски стеблей и соломы получить частицы возможно меньшего размера. Доля взвешенных в жидкости твердых частиц в значительной мере зависит от технических средств, которые используются для получения тщательного перемешивания, гидравлического транспортирования субстрата и отделения газа. Современный уровень развития техники позволяет перерабатывать в сельско-

хозяйственных биогазовых установках субстраты с содержанием твердых веществ до 12%, если длина частиц отдельных волокнистых и стеблевидных твердых компонентов не превышает 30 мм.

В принципе органические вещества можно сбраживать и в твердой фазе, если иметь достаточно влажную среду. Однако сбраживание твердых веществ практически не получило промышленного значения, поскольку в твердой фазе нельзя обеспечить перераспределение и взаимное перемешивание бактерий и субстрата, а также удовлетворительный отвод газа.

Твердые вещества, плотность которых существенно выше, чем жидкости, обуславливают образование осадка (седиментацию) или плавающей корки, чему способствует флотация. Возникающие в связи с этим механико-гидравлические проблемы и ухудшение процесса газообразования могут привести к тому, что для устранения подобных нарушений потребуются более высокие затраты технических средств и энергии. Эти трудности можно исключить, если упомянутые вещества перед подачей в реактор отделить от субстрата с помощью механического сепаратора [53]. Однако это приводит к соответствующему уменьшению выхода газа.

### 1.2.3. Максимальный выход газа

По вопросу о том, какое количество газа может быть выделено из различных сельскохозяйственных отходов, остатков и их смесей при оптимальных условиях сбраживания, имеются весьма разноречивые данные, что объясняется разнообразием состава субстрата. Поэтому мы не можем здесь привести приемлемые для всех условий данные о максимально возможном выходе газа.

Если отнести выход газа, возможный при температуре процесса около 32°C, к количеству разложившейся органической массы, то соответствующие значения будут лежать в пределах  $V_{\text{общ}} = 0,8 \dots 1,0 \text{ м}^3$  на 1 кг разложившейся органической массы.

Напротив, выход газа, отнесенный к единице закладываемой в реактор органической массы, будет находиться в интервале  $V_{\text{общ}} = 0,4 \dots 0,6 \text{ м}^3$  на 1 кг внесенной в реактор органической массы. Таким образом, в зависимости от доли способной к сбраживанию органической

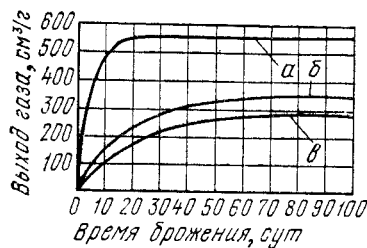


Рис. 5. Выход газа в расчете на 1 г сухого органического вещества типичных сельскохозяйственных материалов при температуре брожения 30 °С [89]:

а — трава; б — солома; в — экскременты крупного рогатого скота.

массы в реакторе разлагается лишь 40...50 % всей закладываемой в него органической массы.

Соотношение количеств газа, которые могут быть выделены из органического вещества жидкого навоза дойных коров (Д), бычков на откорме (Б), свиней (С) и кур (К) в процессе брожения при температуре 33°С, в первом приближении можно принять равным Д:Б:С:К=5:7:8:10 [18].

Для выделения определенного количества газа из различных органических материалов требуется специфическая для каждого из них продолжительность процесса брожения, причем выход газа в единицу времени сначала резко увеличивается, а затем по достижении максимума постепенно уменьшается. Полученные при этом суммарные кривые для типичных объектов брожения представлены на рисунке 5. Из рисунка следует также, что трава, содержащая много белковых веществ, обладает высокой скоростью реакции и дает большой выход газа, в то время как солома и экскременты откармливаемых бычков из-за значительной доли лигнина сбраживаются гораздо медленнее и выделяют меньше газа [89]. Это также хорошо видно из таблицы 7, в которой приводятся данные о возможных значениях выхода газа и о продолжительности процесса, необходимой для полного сбраживания типичных сельскохозяйственных материалов.

О повышении выхода газа при увеличении температуры процесса (до 54°С) уже говорилось выше.

### 1.3. Особенности технологии

Практически достижимый в промышленной установке выход газа зависит от многочисленных факторов, влияние которых, обусловленное конструкцией установки и

Таблица 7. Выход газа и продолжительность цикла брожения (полное сбраживание) для типичных сельскохозяйственных материалов при температуре 30°С [89]

| Сбраживаемый материал             | Выход газа (см³ г), отнесенный |                                       | Время цикла, сут | Содержание CH <sub>4</sub> , % | Выход газа в % от общего количества по истечении времени цикла |        |        |
|-----------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------|------------------|--------------------------------|----------------------------------------------------------------|--------|--------|
|                                   | к исходной массе               | к массе сухого органического вещества |                  |                                | 10 сут                                                         | 15 сут | 20 сут |
| Экскременты откармливаемых бычков | 237                            | 315                                   | 117              | 80                             | 24                                                             | 36     | 48     |
| Свиной навоз                      | 257                            | 415                                   | 115              | 81                             | 40                                                             | 57     | 68     |
| Солома с длиной резки 30 мм       | 357                            | 383                                   | 123              | 80                             | 29                                                             | 38     | 45     |
| Солома с длиной резки 2 мм        | 393                            | 423                                   | 80               | 81                             | 51                                                             | 67     | 77     |
| Картофельная ботва                | 526                            | 606                                   | 53               | 75                             | 85                                                             | 90     | 92     |
| Ботва сахарной свеклы             | 456                            | 501                                   | 14               | 85                             | 99                                                             | 100    | 100    |
| Трава                             | 490                            | 557                                   | 24               | 84                             | 87                                                             | 96     | 99     |

производственными условиями, может быть самым различным. В дополнение к уже названным в разделе 1.2. факторам существенное значение имеют:

- загрузка рабочего пространства (количество загружаемой органической массы, приходящееся на единицу времени и единицу чистого объема реактора);
- технологическое время цикла брожения (время пребывания в реакторе закладываемой в него органической массы);
- интенсивность перемешивания.

#### 1.3.1. Загрузка рабочего пространства

При непрерывном или квазинепрерывном технологическом процессе сбраживания (см. раздел 3.1) наибольшая интенсивность разложения получается в том случае, если количество органического вещества, которое добавляется в единицу времени к находящемуся в реакторе субстрату, соответствует уже разложившемуся к данному моменту количеству органического вещества. Добавление больших партий массы ведет к получению

менее разложившегося субстрата и, следовательно, к меньшему выходу газа [126], добавление меньших партий — к худшему использованию рабочего объема реактора.

Если реактор, работающий в дискретном режиме, заполнять слишком быстро (см. раздел 3.1) то нарушается соотношение между имеющимся количеством активных бактерий и массой питательных веществ, вследствие чего обмен веществ также не может протекать оптимальным образом, и соответственно выделяется меньше газа в единицу времени и на единицу массы органического вещества. Судя по данным, которыми мы сейчас располагаем, наибольший выход газа из экскрементов различных сельскохозяйственных животных при условии хорошего перемешивания и небольшой вязкости субстрата может быть получен при значениях загрузки реактора, приведенных в таблице 8.

Таблица 8. Загрузка рабочего объема реактора, время пребывания и разложения органического вещества при температуре брожения около 33°C [111]

| Экскременты отдельных видов животных | Загрузка реактора, кг органического вещества на 1 м³ в сутки | Время пребывания массы в реакторе, сут | Степень разложения массы, % |
|--------------------------------------|--------------------------------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------|
| Дойные коровы                        | 6,0                                                          | 15                                     | 40                          |
| Бычки на откорме                     | 4,5                                                          | 10                                     | 40                          |
| Свиньи                               | 3,0                                                          | 10                                     | 50                          |
| Куры-несушки                         | 1,5                                                          | 50                                     | 55                          |

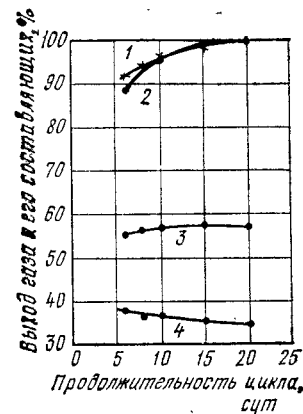
Из таблицы видно, что загрузка реактора должна быть тем ниже, чем выше доля способных к разложению веществ в закладываемой в него органической массе и чем больше в ней аммиака (куриный помет).

### 1.3.2. Технологическое время брожения (время пребывания массы в реакторе) [89, 100]

Потребность во времени, необходимом для полного сбраживания массы, как правило, очень большая, что соответственно должно было бы привести к применению реакторов больших размеров. Поэтому, исходя из экономических соображений, несколько укорачивают время

Рис. 6. Количество и состав выделившегося газа [100]:

1 и 2 — количество всего выделившегося газа и метана соответственно в % от выхода к моменту окончания цикла; 3 и 4 — содержание  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$  соответственно в % от всего выделившегося газа.



пребывания массы в реакторе, сознательно идя на некоторое недополучение газа.

Выбор продолжительности пребывания массы в реакторе зависит, с одной стороны, от скорости реакции, присущей каждому конкретному виду сбраживаемого материала (см. табл. 7 и рис. 5), с другой стороны, от заданной степени разложения, которая определяет выход газа и ослабление интенсивности запаха перебродившей массы (шлама). Кроме того, следует учитывать, что с увеличением времени брожения увеличивается содержание  $\text{CH}_4$  в общем объеме выделяющегося газа и одновременно уменьшается содержание  $\text{CO}_2$ , что означает улучшение качества получаемого газа (рис. 3 и 6).

Таким образом, для выбора оптимального времени пребывания массы в реакторе тоже нельзя дать универсальных рекомендаций. Ориентировочные данные приведены в таблице 8 [111]. Довольно большое время пребывания в реакторе куриного помета обусловлено относительно высоким содержанием аммиака. Отметим, что данные таблицы 8 справедливы лишь для хорошо перемешанных субстратов в реакторах, работающих по проточному принципу (раздел 3.1). Продолжительность брожения в условиях прерывистого производства газа, по современным данным, примерно на 20 ... 25% дольше.

### 1.3.3. Интенсивность перемешивания

Интенсивным перемешиванием содержимого реактора достигается контакт бактерий с субстратом вследствие постоянной перемены ориентации и обновления граничных поверхностей отдельных фаз, а также затрудняется накопление промежуточных и конечных продуктов процесса разложения. Будучи основной предпосылкой высокой скорости реакции, перемешивание способствует

также равномерному распределению питательных веществ в объеме реактора. В то же время оно препятствует образованию осадка и плавающей корки и обеспечивает перемещение массы в реакторе.

## 2. Продукты сбраживания

### 2.1. Газ

#### 2.1.1. Состав газа

Как уже было сказано выше, к основным компонентам биогаза относятся  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$ , соотношение которых зависит от исходного субстрата и характеристик процесса брожения (температуры, времени пребывания массы в реакторе, загрузки рабочего пространства). Наряду с этими важнейшими компонентами биогаз содержит незначительные количества  $\text{H}_2$  и  $\text{H}_2\text{S}$  (табл. 9), а также  $\text{N}_2$ .

Таблица 9. Состав и характеристики биогаза [23, 45, 58, 140]

| Характеристика                                         | Компоненты биогаза |               |              |                      | Биогазовая смесь<br>(60% $\text{CH}_4$ +<br>40% $\text{CO}_2$ ) |
|--------------------------------------------------------|--------------------|---------------|--------------|----------------------|-----------------------------------------------------------------|
|                                                        | $\text{CH}_4$      | $\text{CO}_2$ | $\text{H}_2$ | $\text{H}_2\text{S}$ |                                                                 |
| Объемная доля, %                                       | 55...70            | 27...44       | <1           | <3                   | 10)                                                             |
| Объемная теплота сгорания, МДж/м <sup>3</sup>          | 35,8               | —             | 10,8         | 22,8                 | 21,5                                                            |
| Предел воспламеняемости (со-<br>держание в воздухе), % | 5...15             | —             | 4...80       | 1...45               | 6...12                                                          |
| Температура воспламенения, °С                          | 65...750           | —             | 585          | —                    | 650...750                                                       |
| Критическое давление, МПа                              | 4,7                | 7,5           | 1,3          | 8,9                  | 7,5...8,9                                                       |
| Критическая температура, °С                            | -82,5              | 31,0          | —            | 100,1                | -2,5                                                            |
| Нормальная плотность, г/л                              | 0,72               | 1,93          | 0,09         | 1,54                 | 1,2                                                             |
| Критическая плотность, г/л                             | 102                | 468           | 31           | 349                  | 320                                                             |
| Плотность относительно воздуха                         | 0,55               | 2,5           | 0,7          | 1,2                  | 0,83                                                            |

#### 2.1.2. Свойства газа

Приведенные в таблице 9 физические свойства биогаза позволяют судить о возможностях его практического использования и необходимых для этого приемах. Объемная теплота сгорания ( $Q_v$ ) определяется в основном содержанием  $\text{CH}_4$ , поскольку незначительные количества  $\text{H}_2$  и  $\text{H}_2\text{S}$  на этот показатель практически не влияют. Соответственно температура воспламенения и предел воспламеняемости тоже зависят от содержания  $\text{CH}_4$ . При выяснении возможности сжижения газовой смеси

необходимо учитывать критические значения давления и температуры отдельных ее компонентов (см. табл. 9). Эти значения показывают, что сжижение биогаза практически нецелесообразно. При использовании биогаза следует учитывать разность в плотности отдельных его компонентов. В проходных неvented помещениях это может привести к опасному для жизни людей накоплению  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{S}$  в нижних слоях воздуха. Кроме того, скопление  $\text{CH}_4$  связано с опасностью взрыва.

### 2.2. Перебродивший субстрат (шлам)

#### 2.2.1. Состав шлама [99, 101, 123]

Во время процесса брожения аммиак выделяется из органических азотистых соединений и вместе с соединениями фосфора и калия, имеющимися в субстрате и образующимися в результате разложения, преобразует перебродившую массу в богатое питательными веществами органическое удобрение. Кроме того, в зависимости от степени сбраживания уменьшается содержание углерода по сравнению с его содержанием в исходном субстрате. Обусловленное этим уменьшение соотношения C/N оказывается благоприятным при использовании шлама в качестве удобрения.

#### 2.2.2. Загрязнение окружающей среды

##### Запах [126, 130]

Поскольку степень сбраживания, т. е. разложения органического вещества, достигает 30...40 % и благодаря этому в основном происходит распад биологически нестабильных органических соединений, шлам лишен запаха, свойственного исходному субстрату.

##### Возбудители болезней [2, 62, 75, 85, 145]

Гигиенический эффект анаэробного брожения обуславливается прежде всего тепловым воздействием в течение определенного отрезка времени. Для уничтожения отдельных возбудителей болезней требуется в каждом конкретном случае определенная минимальная температура и минимальная продолжительность их пребыва-

ния при этой температуре. Чтобы гарантировать полное уничтожение вегетативных форм бактериальных возбудителей инфекционных заболеваний, в установках дискретного действия при температуре брожения около 30° для этого необходимо более 30 сут. Более эффективное действие в течение меньшего срока пребывания массы в реакторе (12...20 сут) достигается только при температуре брожения выше 50°С. Однако абсолютно надежного обеззараживания ожидать не следует, так как всегда существует риск, что незначительное число микробов сохранит свою жизнеспособность и сможет послужить источником инфекции. О поведении вирусов, подвергаемых упомянутому воздействию, пока еще не имеется каких-либо данных.

Что касается установок непрерывного и квазинепрерывного действия, то здесь мы рискуем тем, что небольшие порции субстрата выйдут из реактора через несколько меньшее время, чем заданное теоретическими гидравлическими расчетами. Таким образом возникает опасность, что патогенным организмам удастся избежать необходимого для их уничтожения теплового воздействия. Даже в установках проточного типа, как показывают исследования, не удастся уничтожить всех возбудителей болезней, попадающих в реактор вместе с жидким навозом.

### 3. Технологические схемы биогазовых установок

#### 3.1. Системы, применяемые в производстве (рис. 7)

В проточной системе (при непрерывном или квазинепрерывном процессе) субстрат загружают в реактор непрерывно или через короткие отрезки времени (например, ежедневно), удаляя соответствующий объем шлама (рис. 7 и 8). Всегда постоянный объем субстрата рассчитывается в соответствии с заданным гидравлическими расчетами временем пребывания массы в реакторе. Если обеспечивается постоянство условий производства, а именно подачи массы, концентрации сухого вещества и загрузки рабочего пространства, т. е. концентрация способного к брожению органического вещества при загрузке, оптимальная температура брожения и равномерное перемешивание массы, то этот вид производства позволяет получить максимальный выход газа при непрерывном процессе газообразования.

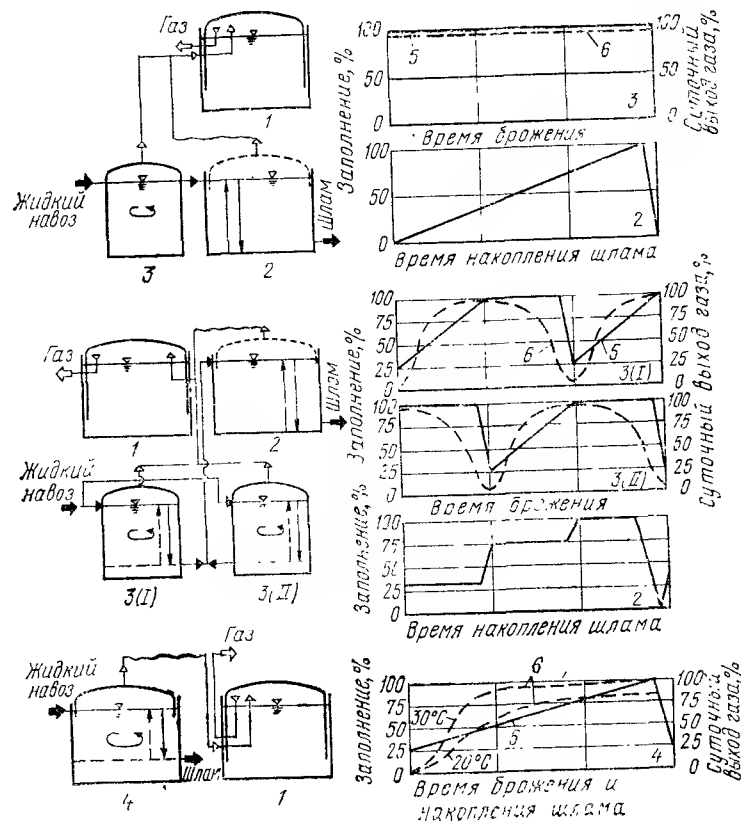


Рис. 7. Системы получения биогаза — проточная (вверху), с попеременным использованием реакторов (в центре); с накоплением газа и шлама (внизу):

1 — газгольдер; 2 — накопитель шлама; 3 — газовая камера; 4 — камера для брожения и накопления шлама; 5 — заполнение; 6 — суточный выход газа.

Система с попеременным использованием реакторов [103, 116, 124] характеризуется прерывистым процессом, протекающим не менее чем в двух одинаковых по размерам и форме реакторах (рис. 7 и 9). В случае (например) ежедневной загрузки свежего субстрата реакторы при образовании определенного количества шлама (так называемого затравочного шлама) попеременно заполняются свежим субстратом и по истечении за-



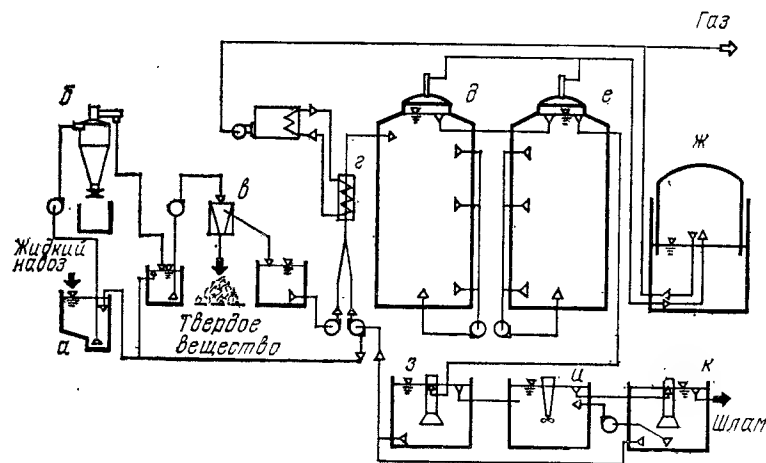


Рис. 8. Метод получения биогаза Редигер / Ферментехник [53] в проточной системе:

а — навозосборник; б — отстойник для песка; в — центрифуга; г — нагревательный агрегат и теплообменник; д, е — реакторы; ж — газгольдер; к — вторичное освещение; и — аэрация; з — первичное освещение.

данного срока брожения опорожняются так, что в них остается только затравочный шлам. Поскольку при постоянном количестве подаваемого в реактор материала загрузка рабочего пространства во время процесса заполнения будет постоянно снижаться по сравнению с оптимальным значением, соответствующим исходному количеству шлама, потенциальная производительность этой системы будет использоваться не полностью. Кроме того, если учитывать наличие порожнего объема реактора во время процесса заполнения, то эта система требует большего рабочего объема, чем проточная; по американским исследованиям, он должен быть вдвое больше [45].

Еще одна особенность рассматриваемой системы заключается в том, что ее нельзя использовать без газового аккумулятора (газгольдера) с постоянным запасом газа, достаточным для заполнения освобождающегося при выгрузке шлама объема реактора. Это требуется для предотвращения попадания воздуха в рабочее пространство реактора.

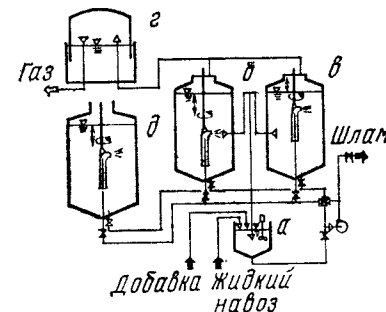


Рис. 9. Метод получения биогаза Шмидт / Эггерглосс [103] по системе с попеременным использованием реакторов:

а — первичная емкость; б, в — реакторы; г — газгольдер; д — силос для удобрений.

Система с накоплением газа и шлама [131] выполняется только с одним жидкостным реактором (рис. 7). Последний играет роль бродильной камеры и накапливает шлам до момента вывозки в поле. Поэтому реактор никогда не опорожняют полностью; остаток шлама служит затравкой для новой порции субстрата. При непрерывной подаче свежего субстрата постоянно снижается время, отводимое для брожения. В результате этого газовый потенциал накопившейся в реакторе массы используется не полностью.

## 3.2. Компоненты установки

### 3.2.1. Реактор

Если, исходя из характера процесса брожения и его технологии, к реакторам предъявляют в основном требования:

- абсолютной герметичности стенок, препятствующей газообмену;
  - непроницаемости для жидкостей;
  - сохранения прочности в статическом состоянии при воздействии собственной силы тяжести и массы загружаемого субстрата;
  - совершенной теплоизоляции;
  - коррозионной стойкости;
  - надежности загрузки и опорожнения;
  - доступности внутреннего пространства для обслуживания,
- то для выбора формы, размеров и конструкции реактора решающую роль играют такие факторы, как:
- массовый расход субстрата при заполнении;

- заданный выход газа или степень сбраживания субстрата как функция от концентрации сухих веществ, загрузки рабочего пространства, времени цикла сбраживания и интенсивности перемешивания;
- применяемая система производства;
- уровень механизации.

Эти факторы определяются условиями производства и целями технологического процесса.

**Форма реактора и применяемые строительные материалы** (рис. 10).

С точки зрения статической прочности, создания условий для перемещения жидкого субстрата (затрат энергии на перемешивание), отвода осадков и разрушения плавающей корки предпочтительным представляется использование яйцеобразного резервуара (рис. 10, а). Однако в крупных установках его делают только из бетона. Поэтому высокая стоимость изготовления таких резервуаров существенно ограничивает их применение. В то же время для меньших объемов (около 30 м<sup>3</sup>) можно изготавливать реакторы такой формы из полиэфирной смолы, армированной стекловолокном (стеклопластика). Весьма возможно, что в будущем резервуары такого типа найдут широкое применение в сельскохозяйственных биогазовых установках.

**Цилиндрический резервуар с конусной верхней или нижней частью** (рис. 10, б), как и яйцеобразный, обладает тем преимуществом, что для него характерны не-

большое пространство для накопления газа, концентрированная в ограниченном объеме плавающая корка, а также хороший отвод шлама. Однако по сравнению с яйцеобразной эта форма реактора создает менее благоприятные условия для перемещения жидкого субстрата. Резервуары такой формы, используемые в коммунальных установках для очистки и разложения стоков, изготавливают из бетона. Для наме-

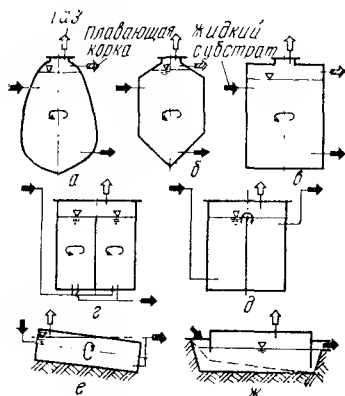
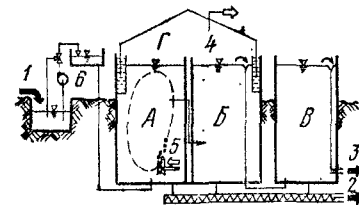


Рис. 10. Формы реакторов для анаэробного сбраживания жидкого навоза.

Рис. 11. Двухкамерная бродильная установка, работающая по проточному принципу [82]:

А — главная бродильная камера; Б — камера для окончательного сбраживания и осаждения шлама; В — накопитель шлама; Г — пространство для накопления газа; 1 — подача жидкого навоза; 2 — отвод крупнодисперсного шлама; 3 — отвод мелкодисперсного шлама; 4 — отбор газа; 5 — перемешивающее устройство, работающее на сжатом газе; 6 — насос.



чаемых к применению в сельском хозяйстве реакторов меньшей вместимости предпочтительнее с точки зрения затрат стальные конструкции. При изготовлении их из стеклопластика можно достигнуть лучших результатов в отношении условий перемещения субстрата.

**Цилиндрический резервуар** (рис. 10, в) по сравнению с резервуарами обеих описанных выше форм создает худшие условия для перемещения субстрата, а также из-за большой поверхности контакта сред требует более высоких затрат на удаление осадка и разрушение плавающей корки, что связано с увеличением расхода энергии на перемешивание. К его преимуществам можно отнести относительно простую технологию изготовления, которая опирается на обширный опыт строительства емкостей для сельскохозяйственных целей (стальные, бетонные, стеклопластиковые силосы для консервирования кормов, зерно- и навозохранилища).

Если цилиндрический резервуар разделить поперечной перегородкой на две камеры, то по сравнению с затратами, необходимыми для изготовления двух отдельных резервуаров (система с попеременным использованием реакторов — рис. 10, г или проточная система — рис. 11), получим экономию.

При такой компоновке не только отпадает необходимость в теплоизоляции наружных стенок резервуара, но и улучшается теплопередача между обеими камерами через перегородку, выполненную из теплопроводного материала. Встраивание в эту перегородку нагревательного устройства дает дополнительные конструктивные и энергетические преимущества [82].

В простых, большей частью небольших установках, возводимых собственными силами, можно делать **бродильную камеру кубической формы** (в виде бассейна или ямы с крышкой), как показано на рисунке 10, д.

Такой реактор можно тоже разделить на две части: главную бродильную камеру и камеру для окончательного этапа сбраживания и осаждения шлама. Установки этого типа не позволяют получить высокую степень разложения субстрата, так как в них не обеспечивается ни равномерное перемешивание массы, ни управление загрузкой рабочего объема камеры и временем пребывания массы в реакторе, что необходимо для получения максимального выхода газа. Разрушение плавающей корки и осадка связано с большими затратами (рис. 12).

В горизонтальном резервуаре (рис. 10, е) субстрат перемещается в продольном направлении, причем для небольших установок можно применять цилиндрические реакторы, сделанные из стали или стеклопластика [26].

Наклонное расположение продольной оси резервуара облегчает стекание шлама по направлению к выгрузному отверстию. Такая конструкция удобна для размещения простейшего перемешивающего механизма (рис. 13).

Бродильная камера в виде вырытой в грунте траншеи (рис. 10, ж и 14) позволяет обрабатывать большие количества субстрата. В качестве строительного материала используют, как правило, бетон. В настоящее время принцип сбраживания в траншее с наклонным дном и плавающей крышкой получил дальнейшее развитие в США (рис. 15).

Из соображений экономии затрат и создания лучших условий для разрушения плавающей корки реакторы более крупных проточных установок оснащаются большей частью жесткими крышками, т. е. не имеют подвижного газового кол-

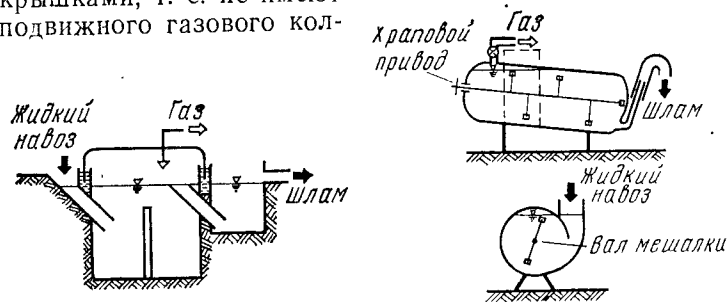


Рис. 12. Простейшая двухкамерная биогазовая установка (Филиппины) [144].

Рис. 13. Горизонтальный реактор с простейшим перемешивающим устройством [11].

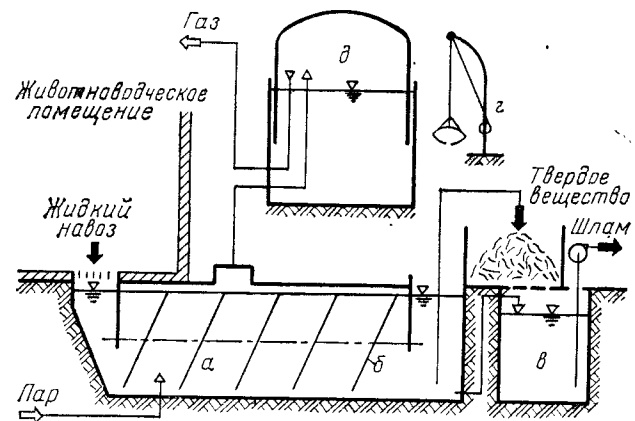


Рис. 14. Траншейная биогазовая установка системы «Дармштадт» [116]:

а — бродильная камера; б — перемешивающее устройство; в — накопитель шлама; г — грейфер для загрузки твердых материалов; д — газгольдер.

лака (газосборника). Более целесообразно регулировать объем пространства для накопления газа в соответствии с его выходом и необходимым давлением в более дешевом специальном газгольдере.

При эксплуатации установок с попеременным использованием реакторов с жестким газосборником, а также аналогичных установок с газгольдерами следует предусмотреть, чтобы освобождающийся при опорожнении реактора объем был обязательно заполнен газом, поступающим в обратном направлении из газгольдера. Такая схема требует соответственно увеличения вместимости газгольдера. В обеих технологических схемах нужно в каждом отдельном случае решать вопрос о рациональности выбора жесткой или плавающей конструкции газосборника с учетом размеров установки, условий ее эксплуатации и затрат на изготовление.

Особое положение занимают эластичные реакторы, используемые в странах Восточной Азии. Они состоят из плотной прорезиненной или пластмассовой оболочки, усиленной тканевыми прослойками и имеющей форму пузыря, которая для восприятия статических нагрузок либо заглублена в полусферическую выемку в грунте

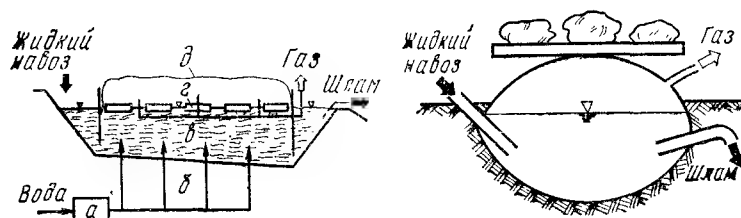


Рис. 15

Рис. 15. Траншейная биогазовая установка «Плаг флоу диджестер» [45]:

а — бойлер; б — подача горячей воды; в — бродильная камера; г — плавающие гермопластовые плиты; д — эластичный газосборник.

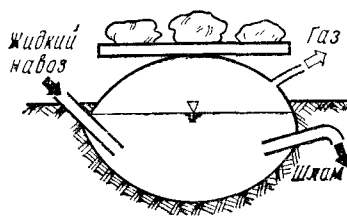


Рис. 16

Рис. 16. Реактор с эластичной оболочкой (Восточная Азия) [144].

(рис. 16), либо находится на поверхности земли и помещается внутри жесткого цилиндрического ограждения [35].

### 3.2.2. Нагревательные устройства

Чтобы получить необходимую для процесса брожения температуру и по возможности поддерживать ее на постоянном уровне, следует прежде всего подогреть подаваемый в реактор субстрат до нужной температуры; дополнительный же подвод теплоты необходим для компенсации тепловых потерь. В принципе теплоту можно подводить к субстрату в рабочем пространстве реактора или в питающем его устройстве. Поскольку перепады температуры отрицательно влияют на ход биологического процесса, необходимо по возможности сочетать подвод теплоты с интенсивным перемешиванием. Кроме того, в системе подвода теплоты необходимо предусмотреть, чтобы на поверхностях теплопередачи не могли откладываться взвешенные в субстрате твердые частицы (поэтому рекомендуются, например, высокие скорости движения субстрата относительно поверхностей теплопередачи) или чтобы эти поверхности легко очищались. И наконец, на работу теплообменника не должно влиять присутствие в субстрате твердых материалов (например, стеблей соломы, перьев, шерсти).

### Подогрев в рабочем пространстве

Для небольших реакторов с перемешивающими устройствами вполне подходят **теплообменные нагревательные агрегаты** (например, шланги, цилиндрические или плоские теплообменники), через которые прокачивается горячая вода ( $\vartheta \leq 60^\circ\text{C}$ ) и которые можно вынимать из реактора при его очистке.

**Нагреватели, встроенные в стенки реактора**, целесообразно применять с точки зрения их КПД лишь в том случае, если они могут передавать теплоту субстрату с обеих сторон стенки, как это происходит в двухкамерном реакторе с внутренней перегородкой (см. рис. 10, г и д и рис. 11).

Кроме того, подогрев субстрата можно осуществлять непосредственно, подавая в него **горячую воду** (см. рис. 13) или пар. Поскольку вода служит одновременно для разбавления и турбулизации субстрата, который при загрузке содержит еще очень большое количество твердых частиц, этот метод может оказаться эффективным. Подогрев субстрата путем введения **пара под давлением** ведет к повышению содержания влаги в газе, для устранения которой при подготовке газа к использованию требуются дополнительные меры. В крупных установках, в особенности в коммунальных установках для очистки стоков, этим недостатком пренебрегают, имея в виду более высокий энергетический КПД теплопередачи.

### Подогрев подаваемого в реактор субстрата

Равномерную передачу теплоты субстрату можно обеспечить с помощью теплообменников, расположенных вне реактора. Однако их следует применять только в сочетании с системой принудительной циркуляции субстрата, что влечет за собой соответствующее повышение затрат, но позволяет надежно регулировать температуру брожения. Эта система подогрева имеет преимущество в том, что благодаря одновременному подогреву и перемешиванию свежего и циркулирующего субстрата разница между температурами поступающего в камеру и уже имеющегося там субстрата будет незначительной. Кроме того, надежно поддерживается скорость перемещения субстрата, необходимая для предотвращения выпадения твер-

дого осадка на поверхностях теплообменника. И, наконец, расположение теплообменников вне рабочего пространства реактора значительно облегчает доступ к ним для обслуживания и ремонта.

В качестве нагревательных агрегатов применяют большей частью трубчатые теплообменники, где теплоносителем служит вода, нагретая до температуры  $\vartheta \leq 60^\circ\text{C}$ . Более высокая температура, которую необходимо было бы поддерживать, в частности в установках с термофильными бактериями, повышает риск налипания взвешенных твердых частиц на поверхность теплообменника. Пока что мы еще не обладаем достаточно большим практическим опытом эксплуатации установок с термофильными бактериями. Равным образом нуждаются в дальнейших исследованиях теплообменники, предназначенные для подогрева загружаемой в реактор массы путем вторичного использования запасенной отводимым субстратом теплоты. Это можно было бы осуществить либо путем прямой теплопередачи с помощью помещенного в шлам теплообменника, либо посредством теплового насоса, оснащенного конденсатором или испарителем, конструкция которого в каждом конкретном случае должна определяться свойствами субстрата [90, 124].

### 3.2.3. Устройства для перемешивания субстрата

Постоянное равномерное распределение и переориентировка жидкости и находящихся в ней твердых веществ, различающихся по размеру, форме и плотности, служат предпосылкой беспрепятственного и эффективного протекания процесса брожения.

#### Механические перемешивающие устройства

Применение вращающихся перемешивающих устройств предъявляет высокие требования к форме реактора, если должны быть обеспечены необходимая для уменьшения образования осадка и плавающей корки скорость перемещения и требующаяся для интенсивного перемешивания субстрата турбулентность во всех зонах реактора. Поэтому такие мешалки могут эффективно и с допустимым расходом энергии использоваться лишь в небольших реакторах при воздействии на тяжелые суб-

страты. Однако, если речь идет о субстратах малой вязкости, содержащих мало веществ, склонных к осаждению или образованию плавающей корки, то механические перемешивающие устройства оказываются эффективными и в относительно крупных реакторах. Для простых небольших установок с незначительным выходом газа механические мешалки, которые в некоторых случаях могут приводиться от руки, представляют собой приемлемое решение.

#### Гидравлические перемешивающие системы

Содержимое крупных реакторов, в особенности цилиндрической формы, можно перемешивать гидравлическим способом, т. е. с помощью струи жидкости. В многочисленных биогазовых установках, построенных в ФРГ 20 лет назад, очень хорошо зарекомендовала себя система с **подвижным соплом** (см. рис. 9) [103]. При горизонтальном направлении сопла, которое вращается вокруг оси реактора и может перемещаться вдоль нее, струя жидкости проникает во все зоны рабочего пространства реактора.

Гидравлические системы с **неподвижным соплом** требуют, напротив, тщательного выбора в соответствии с размерами и формой реактора, чтобы обеспечивать достаточное перемешивание субстрата во всех зонах реактора.

#### Перемешивание с помощью газа

Хорошее качество перемешивания можно получить, **нагнетая полученный в результате брожения газ** в жидкий субстрат (см. рис. 11). Однако при этом субстрат не должен обладать слишком большой вязкостью и быть склонным к образованию плавающей корки; в противном случае следует непрерывно удалять всплывающие частицы [82] или отделять крупные частицы твердого материала от субстрата перед поступлением его в реактор [53]. Пока мы еще не располагаем годными для всех случаев рекомендациями об оптимальных конструкциях, действии и потребностях в энергии названных выше перемешивающих устройств при их применении в реакторах различных размеров и формы, работающих на типичных сельскохозяйственных субстратах с той или иной концентрацией твердых материалов.

## 4. Потребность в энергии

### 4.1. Теплота

Чтобы поддерживать необходимую для процесса брожения температуру, нужно постоянно подводить теплоту к сбраживаемой массе. Потребность в ней складывается из количества теплоты, необходимого для **подогрева** субстрата от температуры, характерной для подаваемого в реактор жидкого навоза, до температуры брожения, и теплоты, идущей на **компенсацию потерь**, вызванных радиацией и теплопроводностью.

Располагая теплотехническими характеристиками субстрата и материала реактора, данными о размерах резервуара, количестве участвующих в процессе материалов, температуре брожения и времени пребывания субстрата в реакторе, в каждом конкретном случае можно достаточно простым способом рассчитать необходимое количество теплоты. Многочисленные примеры такого расчета для сельскохозяйственных биогазовых установок имеются в литературе [28, 45, 77, 111].

#### 4.1.1. Подогрев сбраживаемой массы

Количество теплоты, которым мы должны располагать для подогрева загружаемой в реактор массы до температуры процесса, зависит от массы субстрата, его средней удельной теплоемкости, разности между температурами процесса и загружаемого материала.

Значения массы субстрата и его удельной теплоемкости для заданного числа животных и способа их содержания можно в первом приближении считать постоянными. Напротив, разность температур подвержена сезонным колебаниям, поскольку экскременты из животноводческого помещения поступают в реактор при температуре окружающей среды. Если принять удельную теплоемкость жидкого субстрата равной теплоемкости воды, то для подогрева 1 кг жидкого навоза на 1 К (1°C) требуется количество теплоты, равное 4,18 кДж.

#### 4.1.2. Компенсация тепловых потерь

Тепловые потери в реакторе определяются:

— разностью между температурой сбраживаемой массы и характерной для каждого конкретного случая на-

ружной температурой отдельных поверхностей реактора;

- величиной поверхностей контакта субстрата и наружного воздуха, субстрата и грунта, газа (в пространстве над зоной брожения) и наружного воздуха;
- коэффициентом теплопередачи материала той или иной стенки;
- коэффициентом теплопередачи на поверхности контакта между отдельными средами;
- толщиной отдельных слоев стенок.

Так как с увеличением размеров реактора уменьшается отношение площади его поверхности к объему, потери теплоты у более крупных реакторов, отнесенные к единице объема, будут ниже. Для цилиндрических реакторов (проточная система, температура брожения 32,5°C) различных размеров, изготовленных из бетона с изолирующим слоем полиуретана толщиной 50 мм, значения суточных потерь теплоты, как показывают американские данные, колеблются от 8% (для объема 400 м³) и 11% (для 124 м³) до 16% (для 60 м³) количества теплоты, необходимого для подогрева ежедневно загружаемого субстрата [45]. Расчеты, сделанные несколько лет назад для реакторов соответствующих размеров при аналогичных условиях, дали втрое большие значения тепловых потерь [77].

Если известны суточные и сезонные колебания внешней температуры, учтены КПД получения теплоты из газа и его выход из сбраживаемой массы, то можно определить необходимое для подогрева количество газа.

Следовательно, общая потребность в теплоте для биогазовой установки определяется главным образом затратами на подогрев субстрата до температуры брожения. Потребность в теплоте для компенсации потерь может быть снижена на несколько процентов путем применения соответствующей изоляции.

### 4.2. Механическая энергия

#### 4.2.1. Перемешивание

Потребность в энергии, затрачиваемой на перемешивание субстрата, зависит:

- от необходимой степени перемешивания;
- вязкости субстрата;
- формы и размеров реактора;

— конструкции, величины, эксплуатационных характеристик (например, частоты вращения) и расположения мешалки.

Предварительный расчет затрат энергии пока еще не представляется возможным из-за отсутствия универсальных количественных рекомендаций по режимам работы перемешивающих устройств в условиях эксплуатации сельскохозяйственных биогазовых установок. С другой стороны, данные, базирующиеся на измерениях или практическом опыте, имеют лишь ограниченное применение, так как опираются на конкретные условия, которые в большинстве случаев недостаточно точно определены.

Более надежные данные о потребности энергии на перемешивание имеются для установок биологической очистки коммунальных стоков. Для реакторов вместимостью до 500 м<sup>3</sup> принимают потребность в электрической мощности, равную 30...60 Вт/м<sup>3</sup>, при времени включения не менее 4 ч и паузами между рабочими циклами не более 7 ч [62].

#### 4.2.2. Насосы

К важнейшим факторам, определяющим потребность в энергии для привода насосов, относятся:

- вязкость субстрата;
- необходимая в каждом конкретном случае объемная подача;
- конструкция насоса;
- сечение, а также число и кривизна колен в трубопроводах.

Так как насосы для перекачки жидкого навоза достигли высокого технического уровня, мы располагаем необходимым производственным опытом и данными о потребности в энергии для различных условий эксплуатации, характерных для биогазовых установок. Это относится также к насосам, которые снабжены устройством для измельчения волокнистых и соломистых частиц.

### 4.3. Покрывание потребности в энергии

#### 4.3.1. Газ

Наиболее целесообразно использовать биогаз в качестве источника получения теплоты. Его можно, например, применять непосредственно для подогрева воды, которая

в этом случае пропускается через теплообменник; тогда потери энергии минимальны. Вторая возможность — использование газа в двигателе внутреннего сгорания (например, для привода электрогенератора), причем вода из системы охлаждения двигателя поступает в теплообменники. Теплоту выпускных газов двигателя можно дополнительно использовать для работы водонагревателя. Хватит ли отбросной теплоты газового двигателя на то, чтобы в любое время года покрыть потребность установки в теплоте, сказать с уверенностью еще нельзя. Для ответа на этот вопрос необходимо также выяснить возможность вторичного использования отбросной теплоты перебродившей массы.

#### 4.3.2. Вторичное использование теплоты

Теплота, содержащаяся в удаляемом из реактора шламе, представляет собой дополнительный резерв энергии, который следует по возможности использовать для подогрева загружаемого субстрата и компенсации тепловых потерь в реакторе. Простейшая возможность такой утилизации энергии — непосредственный перенос теплоты, когда поступающий в реактор жидкий субстрат подогревается в теплообменнике, где теплоносителем служит удаляемая из реактора жидкая масса, которая пропус-

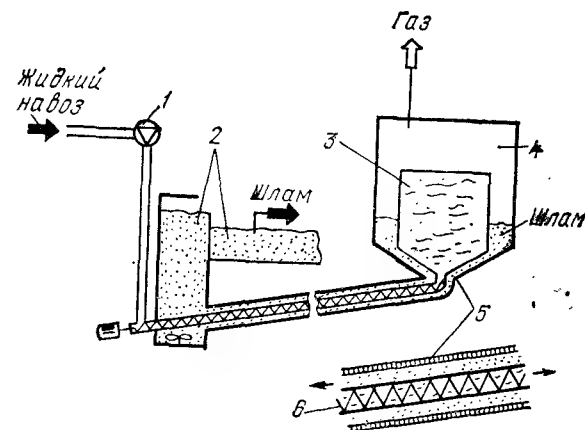


Рис. 17. Подогрев свежего субстрата за счет отбросной теплоты удаляемой из реактора массы по шведскому предложению [143]: 1 — насос; 2 — накопитель шлама; 3 — реактор; 4 — пространство для накопления газа; 5 — слой теплоизоляции; 6 — открытый шеек.

кается через трубки аппарата или омывает их. Хорошо использовать отбросную теплоту удается в том случае, если удаляемая жидкая масса не подается в промежуточный накопитель, а поступает непосредственно в теплообменник (например, противоточного типа [111]) и там отдает свою теплоту, причем температура массы падает до температуры загружаемого субстрата. Правда, такие схемы, в которых первичный жидкий субстрат проходит через накопитель шлама, имеют более простое конструктивное решение (рис. 17), однако в этих случаях вторично используется сравнительно небольшая часть энергии вследствие тепловпотерь в накопителе шлама.

Опосредствованный перенос теплоты с помощью **теплового насоса** связан с относительно высокими первоначальными затратами. Однако эта система утилизации теплоты представляет собой очень хороший способ использования энергии, в особенности там, где тепловой насос работает в сочетании с газовым двигателем (с использованием отбросной теплоты, см. ч II, раздел 7.2) и испаритель (или конденсатор) находится в непосредственном контакте со сбраживаемой массой (рис. 18).

Во избежание тепловпотерь в этом случае необходимо промежуточное хранение теплоты, отработавшей в реакторе жидкости в отдельном, хорошо изолированном резервуаре, объем которого определяется испарительной

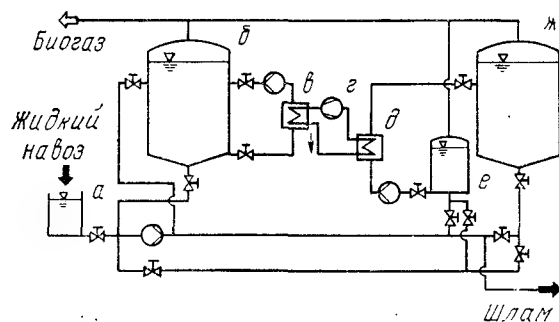


Рис. 18. Использование отбросной теплоты удаляемого из реактора шлама с помощью теплового насоса [124]:

а — навозоприемник с перемешивающим устройством; б — реактор; в — конденсатор; г — компрессор; д — испаритель; е — промежуточный накопитель шлама с теплоизоляцией; ж — накопитель шлама.

способностью и массовым расходом удаляемого из реактора жидкого субстрата. Наличие крупных частиц, а также взвешенных в первичном субстрате и удаляемой массе твердых веществ предъявляет особые требования к конструкции теплообменника.

### 4.3.3. Прочие источники энергии

Некоторую экономию внешней энергии и биогаза можно получить за счет использования дополнительных источников энергии, которые имеются в отдельных случаях.

#### Теплота животноводческих помещений

Можно достичь существенного снижения энергетических затрат, если экскременты животных на пути к реактору будут терять по возможности меньше своей естественной теплоты. Поэтому надо стремиться к максимальному уменьшению расстояния между животными и реактором и обеспечению хорошей теплоизоляции трубопроводов, прокладываемых за пределами животноводческих помещений. И наконец, если разместить реактор внутри этих помещений, потери теплоты еще более сократятся [20, 29].

#### Теплота окисления

При аэробном разложении органических веществ высвобождается такое количество теплоты, что в благоприятных условиях температура субстрата может достигать  $70^{\circ}\text{C}$  [4]. Так как эта тепловая энергия образуется теми же веществами, которые выделяют биогаз, двухступенчатый процесс брожения, состоящий из первой, аэробной фазы, имеющей целью получение теплоты, и второй, анаэробной, служащей для производства газа, всегда связан с меньшим выходом газа. Кроме того, следует учитывать тот факт, что аэробное брожение (компостирование) без дополнительной затраты энергии (не считая подготовки) возможно лишь при наличии твердого и влажного органического материала, который обладает благоприятной для газообмена пористой структурой. Жидкие субстраты, напротив, требуют для внесения в них воздуха с одновременным интенсивным перемешиванием больших затрат энергии, которые неблагоприятно сказыва-



ются на общем энергетическом балансе. Дополнительные затраты денежных средств в этом случае также относительно велики.

Окончательное суждение о возможности использования теплоты окисления в сочетании с производством биогаза можно будет вынести только тогда, когда станут известны результаты еще незаконченных исследований по использованию теплоты биогенного происхождения.

### Солнечная энергия

Если для покрытия тепловых потребностей биогазовых установок использовать солнечную энергию, это потребовало бы строительства дорогостоящих теплоаккумуляторов, поскольку количество теплоты, поступающей на землю с солнечным излучением, резко колеблется в течение суток, года, а также в зависимости от местных климатических условий. Другой недостаток состоит в том, что в течение года потребность в теплоте и количество теплоты, поступающей с солнечным излучением, не равны между собой. Поэтому в наших широтах в отличие от регионов с интенсивным и равномерным солнечным излучением использование гелиотехники в биогазовых установках имеет второстепенное значение.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БИОГАЗА

Э. ДОНЕ И М. БРЕННДЕРФЕР

### 5. Аккумулирование газа

Чтобы рационально использовать биогаз в сельскохозяйственном производстве, необходимо предусмотреть аккумулирование газа в определенном объеме, поскольку производство газа и его потребление не соответствуют одно другому.

#### 5.1. Технические возможности

Аккумулирование газа в коммунальных сетях газоснабжения служит с давних пор для выравнивания колебаний потребления и его пиков, различий в качестве газа, отклонений от расчетной производительности газовых установок (временные нарушения, аварии и т. п.).

Все это, разумеется, справедливо и для биогазовых установок. Объединение в систему неприменимо к биогазовым установкам, которые служат для обеспечения только собственных нужд хозяйства, однако при проектировании крупных установок для снабжения нескольких потребителей (в определенной местности) эту возможность следует иметь в виду. Хотя непрерывная подача газа и добавление в общую систему резервных объемов, характерное для коммунальной газовой сети, позволяли бы эксплуатировать крупные биогазовые установки без дорогих индивидуальных аккумуляторов газа, такая технология вряд ли может быть реализована из-за различного состава газа и нестабильности его качественных показателей. Регулирование производства газа в соответствии с его потреблением возможно лишь в ограниченных размерах.

Пики в потреблении газа могут возникать:

- на протяжении суток (например, в домашнем хозяйстве в полдень и вечером — во время обеда и ужина, в сельскохозяйственном производстве — при доении и кормлении животных);
- в течение недели (например, в дни с особенно большой потребностью в горячей воде для стирки и мытья);
- в различные сезоны года (например, в периоды консервирования овощей и фруктов, уборки урожая, сушки сельскохозяйственных продуктов, отопительный сезон в холодное время года).

Потребность в энергии во время суточных и недельных пиков еще можно предусмотреть с относительной точностью, но для отопительного сезона — лишь весьма приблизительно. На рисунке 19 показаны месячные колебания потребления в коммунальном предприятии газоснабжения; наименьший и наибольший месячные расходы газа относятся как 1:3 [36]. В сельскохозяйственном предприятии, полностью обеспечиваемом газом как источником энергии, наблюдается аналогичная тенденция, но с несколько большими различиями из-за сезонных пиков потребления. В главе 8 приведены возможные графики потребления газа для сельскохозяйственных предприятий разного типа.

Существует четыре варианта обеспечения потребителя необходимой для него энергией:

- а) производство газа выше, чем потребность в нем, даже пиковая. Избыточное количество газа сжигается в факелах или используется каким-либо образом в рамках предприятия или вне его;

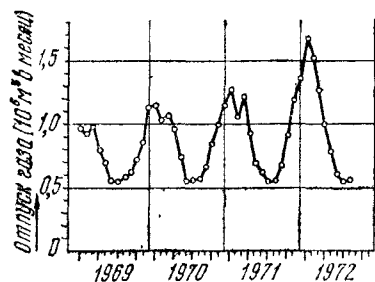


Рис. 19. Изменение ежемесячного отпуская газа газоснабжающим предприятием с 1969 по 1972 г. [36].

- б) непрерывному производству газа подчинять только соответствующее ему основное потребление. Незначительные колебания выравнивать с помощью небольшого буферного газгольдера. Выходящую за эти пределы пиковую потребность покрывать за счет других видов энергии. Ни

в коем случае не следует отказываться от применения электрического тока на предприятии. Обеспечение двумя видами энергии сводит к минимуму опасность аварий;

- в) использовать другой дополнительный источник газа только для покрытия пиков потребления, чтобы иметь одну систему газоснабжения, например от сети снабжения природным газом. Пропан не подходит для этого случая, так как речь идет о другом семействе газов. Для небольших биогазовых установок, большей частью принадлежащих хозяйствам, этот вариант по экономическим соображениям практически не годится;
- г) в периоды спада потребления накапливать избыток газа, имея в виду покрытие потребности в нем во время пиков. В этом случае следует рассчитать баланс производства и потребления газа на более продолжительный отрезок времени. При некоторых ситуациях использование газгольдера может быть неэкономичным.

Из перечисленных вариантов для небольших сельскохозяйственных биогазовых установок больше подходит вариант б, для крупных установок — а в сочетании (в отдельных случаях) с вариантом г. Можно попытаться приспособить потребление газа к его производству и выравнивать суточные, а также недельные колебания путем аккумуляции газа. В установках, принадлежащих хозяйствам, аккумуляция газа для выравнивания сезонных колебаний потребления бесспорно необходима по экономическим соображениям [36] (см. табл. 10). Если возможный выход газа меньше, чем потребность в нем, можно выбрать вариант газоснабжения, обеспечивающий лишь часть всего потребления; если же выход больше потребления, следует несколько уменьшить масштабы производства газа или сжигать его в факелах (в данном случае только в периоды спада нагрузки). В качестве следующего шага следовало бы разработать способы рационального его применения. Все стоимостные расчеты можно проводить только с учетом фактически используемого количества газа.

Приведенные ниже основные технические варианты газгольдеров известны из практики коммунального снабжения светильным и природным газом, из опыта использования промышленных газогенераторов, а также пер-

вых биогазовых установок и современных станций биологической очистки (рис. 20). Для биогазовых установок сельскохозяйственных предприятий первые четыре типа газгольдеров не подходят.

### Подземное газохранилище пористого типа

Речь идет о хранении газа под давлением в подземном пласте пористой породы, который сверху и с боков ограничен газонепроницаемыми слоями. Эксплуатируемые в настоящее время хранилища такого типа имеют газоместимость 40...500 млн. м<sup>3</sup>. В соответствии с опытными данными 55% этого объема можно использовать для практических целей.

### Подземное газохранилище кавернозного типа

Газ можно хранить под давлением в специально оборудованных под землей газонепроницаемых полостях (кавернах). Вместимость таких хранилищ 4...30 млн. м<sup>3</sup>. Давление, под которым находится газ, составляет от 6 до 16 МПа. 55...65% газоместимости может быть использовано для практических целей.

### Газгольдер для сжиженного природного газа

При температуре  $-161^{\circ}\text{C}$  природный газ (а также очищенный от  $\text{CO}_2$  биогаз) при нормальном давлении можно перевести в жидкое состояние. При этом объем его значительно уменьшается (примерно в 600 раз), т. е. 1 м<sup>3</sup> емкости газгольдера содержит 600 м<sup>3</sup> газа.

В настоящее время строят такие газгольдеры на 100...100 000 м<sup>3</sup>, причем их геометрический объем используется полностью.

### Газгольдер абсорбционного типа

Метан можно растворять под давлением в жидком углеводороде (пропан-бутан). Этим способом удастся в том же объеме запастись газом в 4...6 раз больше, чем другим способом под тем же давлением. Вместе с отпусаемым метаном уходит часть ( $\sim 4\%$ ) находящегося в газгольдере сжиженного газа. Обусловленное этим повышением теплоты сгорания газа компенсируется регулируемой добавкой воздуха [36].

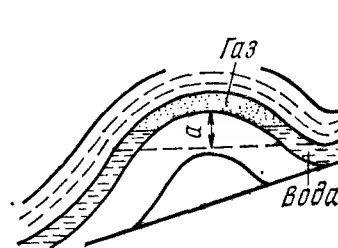


Рис. 20.1. Газохранилище пористого типа [36]:

а — высота водяного затвора.

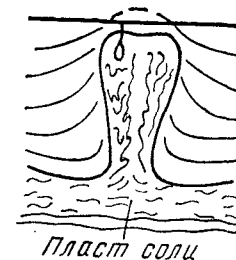


Рис. 20.2. Газохранилище кавернозного типа [36].

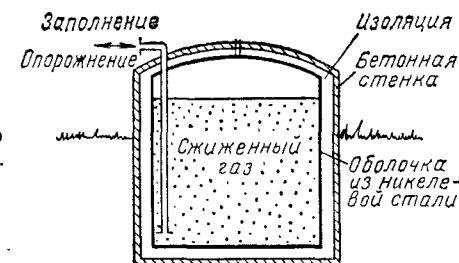


Рис. 20.3. Газгольдер для сжиженного газа.

Рис. 20.4. Газгольдер абсорбционного типа [36]:

1 — резервуар высокого давления с теплоизоляцией; 2 — насос для закачки сжиженного газа; 3 — насос для циркуляции сжиженного газа; 4 — охладитель сжиженного газа; 5 — компрессор для природного газа; 6 — охладитель природного газа; 7 — подогреватель метана; 8 — воздушный компрессор; 9 — смеситель с регулятором; 10 — насос для откачки сжиженного газа; 11 — испаритель сжиженного газа; 12 — редуктор давления.

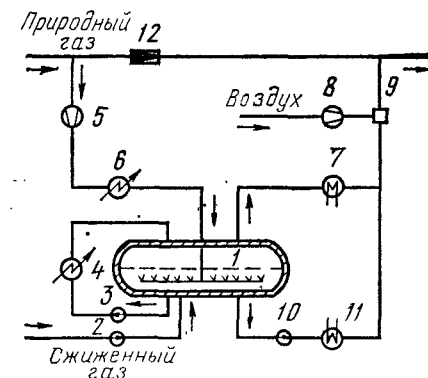


Рис. 20.5. Сферический газгольдер высокого давления.

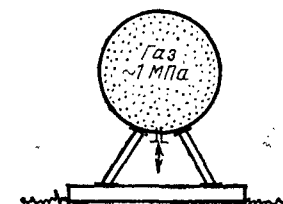


Таблица 10. Ориентировочные данные о капиталовложениях в газгольдеры

| Газохранилище (газгольдер)                            | Расчетный параметр —<br>газовместимость, м³ | Удельная стоимость (марки ФРГ на 1 м³) в расчете на единицу объема газгольдера | Головные амортизационные отчисления (1% от стоимости), марки ФРГ на 1 м³ | Максимальная стоимость 1 м³ биогаза (марки ФРГ) при использовании газгольдера для выравнивания пиков |                            |                              |      |
|-------------------------------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|------------------------------|------|
|                                                       |                                             |                                                                                |                                                                          | суточных                                                                                             |                            |                              | 12х* |
|                                                       |                                             |                                                                                |                                                                          | 305х*                                                                                                | 52х*                       | месячных                     |      |
| 1. Подземное пористого типа                           | 40...500 млн.                               | 0,4...0,02                                                                     |                                                                          |                                                                                                      |                            |                              |      |
| 2. Подземное кавернозного типа (в пещерах и пустотах) | 1...10 млн.                                 | 5...1                                                                          |                                                                          |                                                                                                      |                            |                              |      |
| 3. Газгольдер для сжиженного природного газа          | 1...50 млн.                                 | 2,4...0,6                                                                      |                                                                          |                                                                                                      |                            |                              |      |
| 4. Абсорбционный типа                                 | 10 000...120 000                            | 50...15                                                                        |                                                                          |                                                                                                      |                            |                              |      |
| 5. Сферический газгольдер высокого давления           | 10 000...100 000                            | 30...20                                                                        |                                                                          |                                                                                                      |                            |                              |      |
|                                                       | 4 000...5 000                               | 120                                                                            |                                                                          |                                                                                                      |                            |                              |      |
| 5а. Трубчатый газгольдер высокого давления            | 10...50                                     | 1750...1500                                                                    |                                                                          |                                                                                                      |                            |                              |      |
| 6. Мокрый газгольдер низкого давления                 | 100 000                                     | 50...25                                                                        | 6...3                                                                    | 0,02...0,01                                                                                          | 0,12...0,06                | 0,50...0,30                  |      |
| 7. Сухой газгольдер низкого давления                  | 100...5 000<br>(10 000)                     | 1000...200<br>(100)                                                            | 120...14<br>(12)                                                         | 0,33...0,04<br>0,33...0,07                                                                           | 2,30...0,27<br>2,30...0,46 | 10,00...1,20<br>10,00...2,00 |      |
| 8. Надувной газгольдер низкого давления               | 3...125                                     | 4000...1000                                                                    | 480...120                                                                | 1,30...0,33                                                                                          | 9,25...2,30                | 40,00...10,00                |      |
| 9. Газгольдер-баллон низкого давления                 | 25...800                                    | 2000...250                                                                     | 240...30                                                                 | 0,65...0,08                                                                                          | 4,60...0,58                | 20,00...2,50                 |      |
|                                                       | 5...300                                     | 600...100                                                                      | 72...12                                                                  | 0,20...0,03                                                                                          | 1,40...0,23                | 6,00...1,00                  |      |

\* Минимальная кратность использования в течение года. При большей кратности удельная стоимость 1 м³ газа снижается.

### Газгольдер высокого давления

Почти всегда для газгольдеров такого типа выбирают сферические резервуары. Они работают обычно при рабочем давлении 0,8...1 МПа (строятся газгольдеры, рассчитанные на максимальное рабочее давление до 1,8 МПа) и имеют вместимость 10...100 тыс. м³. Естественно, можно строить и небольшие газгольдеры высокого давления — всего на 10...20 м³. К их преимуществам относятся сравнительно небольшие габариты и отсутствие каких-либо движущихся частей. Недостатком считается необходимость в компрессорной установке. Биогаз приходится засасывать из бродильной камеры реактора. Для использования газа в качестве топлива требуется дополнительно понизить давление до 1...5 кПа. На газгольдеры названного типа распространяются все требования техники безопасности, предъявляемые к резервуарам высокого давления.

Трубчатые газгольдеры высокого давления обычно строят вместимостью до 100 тыс. м³ газа с рабочим давлением 7 МПа.

### Мокрые газгольдеры низкого давления колокольного типа

Номинальная вместимость таких газгольдеров составляет 500...300 тыс. м³; до вместимости 1500 м³ их делают, как правило, одноподъемными, при большей вместимос-

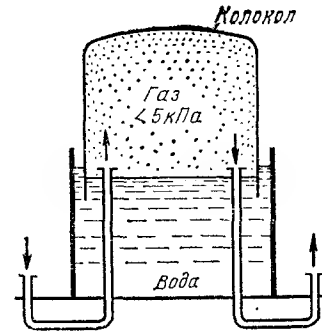


Рис. 20.6. Мокрый одноподъемный газгольдер низкого давления.

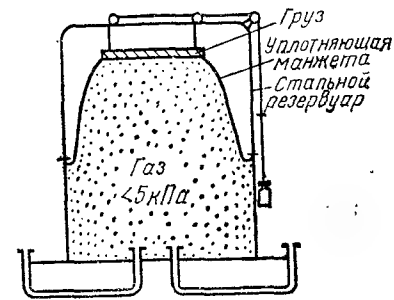


Рис. 20.7. Манжетный газгольдер низкого давления.

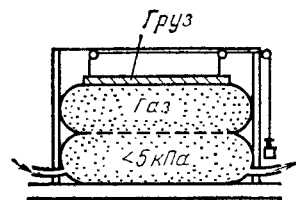


Рис. 20.8. Оболочковый газгольдер низкого давления.

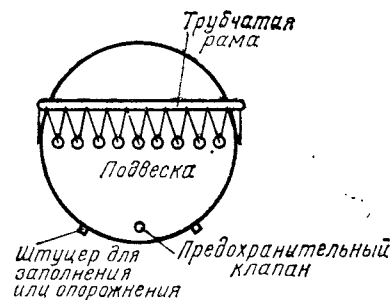


Рис. 20.9. Газгольдер-баллон низкого давления (подвешенный на трубчатой раме).

ти — многоподъемными. Их недостаток — опасность замораживания зимой, что вызывает необходимость в отоплении. До сих пор в биогазовых установках чаще всего применяли мокрые газгольдеры низкого давления. Все эксплуатируемые в Восточной Азии примитивные биогазовые установки [144] оснащены мокрыми газгольдерами с колпаками, которые почти всегда плавают непосредственно в бродильной камере (рис. 21), большей частью в самом жидком навозе. Небольшие потери газа по периферии колокола не играют роли.

#### Сухой газгольдер низкого давления

Может быть дискового или манжетного типов. Для сохранения постоянного давления служит уплотняющая манжета, находящаяся под действием груза, который может перемещаться параллельно самому себе, или диск с кольцевым уплотнением, который может двигаться относительно стенок и также сохранять расположение, параллельное первоначальному. Выпускаются, как правило, номинальной вместимостью 2000...300 тыс. м<sup>3</sup>, но начинают уже изготавливать и меньшего объема — от 50 м<sup>3</sup>. Рабочее давление обычно составляет 2...5 кПа. Массивный фундамент не требуется. Основание газгольдера можно герметизировать с помощью пленки. В среднем такой газгольдер обходится дешевле на 20%, чем мокрый.

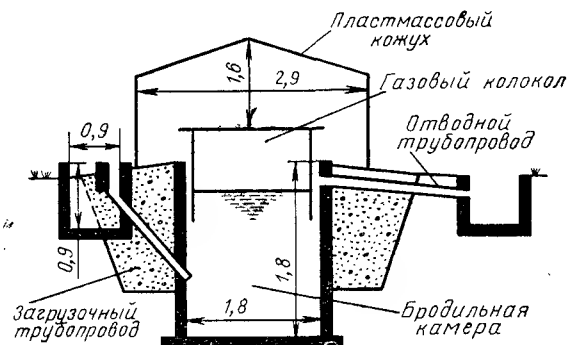


Рис. 21. Разрез простой биогазовой установки, применяемой в Азии, (размеры в м), облицованный пластиком деревянный газовый колокол плавает в бродильной камере [144].

#### Оболочковый газгольдер низкого давления

В качестве емкости для газа служит герметическая оболочка (подушка). Груз, перемещающийся параллельно самому себе, оказывает на нее постоянное предварительное давление. Такая конструкция требует устройства фундаментной плиты средней прочности. Оболочковые газгольдеры уже широко применяются в установках для очистки городских стоков. Для защиты от повреждений такой газгольдер необходимо устанавливать в специальном кожухе.

#### Газгольдер-баллон низкого давления

В качестве емкости для газа используется простой цилиндрический или сферический баллон из многослойной синтетической ткани. Рабочее давление обычно не превышает 2 кПа, но в случае необходимости может быть и больше. Баллоны изготавливаются серийно вместимостью 5...300 м<sup>3</sup>. С увеличением их объема уменьшается стоимость 1 м<sup>3</sup> газа, стоимость же газа в расчете на 1 кг перерабатываемого материала остается практически постоянной (110...120 марок ФРГ). Такие баллоны снабжаются анкерным креплением и должны монтироваться с учетом защиты от механических повреждений. Их можно размещать даже под полом. Они не имеют, естественно, устройства для сохранения постоянного дав-

ления при разных степенях заполнения. Складные емкости вместимостью 0,5...100 м<sup>3</sup>, уже применяемые для хранения жидкостей, принадлежат к той же группе.

Весьма трудно получить достоверные сравнимые стоимостные показатели для различных газгольдеров, поскольку эти значения, а также технико-экономические данные и время их получения слишком сильно варьируют. В качестве довольно грубого приближения можно рассматривать таблицу 10, которая базируется на частично пересчитанных данных фирм и литературных источников [36, 79, 95]. Само собой разумеется, что удельная стоимость газгольдера резко возрастает с уменьшением его размера, что обусловлено относительно высокими затратами на оплату труда и материалов. Рассчитанные кривые, полученные несколько лет назад за пределами ФРГ [95], могут быть использованы еще и сегодня в качестве относительных данных (рис. 22), но, конечно, не по своим абсолютным значениям.

Из таблицы 10 и рисунка 22 видно, что стоимости используемых до сих пор газгольдеров номинальной вместимостью до 200 м<sup>3</sup> (такие газгольдеры чаще всего применяются в принадлежащих хозяйствам биогазовых

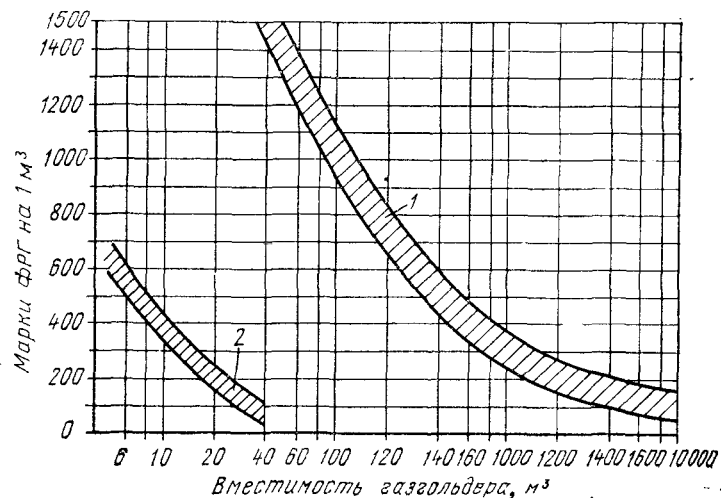


Рис. 22. Первоначальные затраты на 1 м<sup>3</sup> вместимости газгольдера низкого давления:

1 — газгольдер низкого давления; 2 — газгольдер-баллон низкого давления.

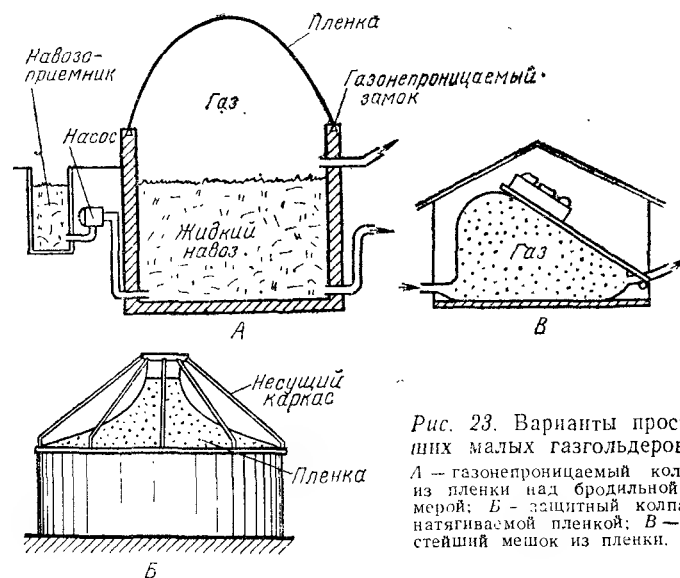


Рис. 23. Варианты простейших малых газгольдеров:

А — газонепроницаемый колокол из пленки над бродильной камерой; Б — защитный колпак с натягиваемой пленкой; В — простейший мешок из пленки.

установках) исключительно высоки: они приближаются к 20...30% стоимости всей установки. Поэтому, исходя из экономических соображений, газгольдер нужно использовать только для выравнивания суточных пиков в потреблении газа. Учитывая те же соображения, не следует строить газгольдер больших размеров, чем это безусловно необходимо; нужно попытаться планировать при помощи рационального подбора газопотребляющей аппаратуры возможно более равномерное потребление газа, без пиков (т. е. заранее рассчитывать кривые ожидаемого потребления). С другой стороны, надо искать новые решения, которые позволили бы снизить затраты на сооружение и обслуживание газгольдеров, и это тем более необходимо, чем меньше типоразмер проектируемой установки. Взаимопомощь отдельных хозяйств в этом плане может иметь лишь ограниченное применение.

Ниже рассматриваются три возможных варианта конструкции простейшего малогабаритного газгольдера с точки зрения его реализации (рис. 23):

- газонепроницаемый колокол над бродильной камерой;
- защитный колпак с натягиваемой пленкой;
- простейший мешок из пленки.

В принципе при рассмотрении этих конструкций нужно учитывать два фактора:

- влияние ветровой, дождевой и силовой нагрузки;
- необходимое равномерное рабочее давление.

С точки зрения первого фактора простейшие колпаки из пленки имеют некоторые недостатки. При отсутствии газа (в начале работы или при холостом ходе, а также в случае повреждения) они опускаются на поверхность навоза, при сильном ливне на пленке могут скопиться десятки килограммов воды. С другой стороны, большие надувные сооружения при избыточном давлении газа (0,3 кПа) могут противостоять даже сильному ветру. Такие сооружения-оболочки, не имеющие герметичного основания, при площади пола 1000 м<sup>2</sup> стоят около 30...85 марок ФРГ за 1 м<sup>2</sup>. Колпаки из натягиваемой пленки используются для укрывания навозохранилищ и осветлителей городских стоков с целью предотвращения распространения запахов. Благодаря наличию кривизны в двух направлениях такая пленка не служит источником вибраций и шума. Несущая часть конструкции находится снаружи и таким образом защищена от агрессивной внутренней среды. По данным промышленности, уплотнение силоса, избыточное давление в котором не превышает 0,1 кПа, не представляет трудности так же, как и дополнительная теплоизоляция. Пленочный колпак для силоса диаметром 9 м (не герметический) стоит сейчас 7000...8000 марок ФРГ, или на 1 м<sup>2</sup> площади основания 110...120 марок ФРГ, двойное пленочное покрытие удорожало бы стоимость примерно на 20%.

Что касается цен на простые пленочные мешки, то, например, мешок вместимостью 25 м<sup>3</sup>, изготовленный только из пленки, стоит 4000 марок ФРГ, 50 м<sup>3</sup> — 5000 марок ФРГ; примерно столько же стоят газгольдеры-баллоны аналогичных размеров. Иногда называют цифры 15...20 марок ФРГ за 1 м<sup>2</sup> поверхности пленки.

Нагружение пленочного мешка для получения равномерного давления газа не представляет трудности (для этой цели используют ящики с камнем или гравием, устанавливаемые на подвижной площадке).

## 5.2. Правовые вопросы

Какие законоположения и инструкции следует учитывать при сооружении газгольдера? Источником опасности могут служить и газ и сам газгольдер.

## Опасность со стороны газа (газовый состав)

Метан, входящий в состав биогаза, практически не ядовит. Он легче воздуха, легко воспламеняется и образует с воздухом (5...15% метана) или кислородом взрывчатую смесь. В случае утечки при наличии соответствующей вентиляции газ улетучивается без каких-либо опасных последствий. Небольшие примеси воздуха не опасны; на практике регулируемое примешивание воздуха применяется даже при использовании природного газа [36, 48] и пропана [136] (для доведения до определенной теплоты сгорания). Если H<sub>2</sub>S и представляет опасность для здоровья людей, то он встречается лишь в виде следов, причем легко обнаруживается по неприятному запаху. Поскольку H<sub>2</sub>S тяжелее воздуха, необходимо обращать внимание на то, чтобы при утечках этот газ не смог скапливаться в углублениях (контрольных шахтах). При высокой концентрации он притупляет восприятие запаха нервными волокнами, что затрудняет его обнаружение и может привести к смертельным отравлениям.

Из-за коррозионного действия H<sub>2</sub>S нужно удалять из биогаза перед его применением [142] — см. приложение 1. H<sub>2</sub>S способствует также коррозионному растрескиванию стальных резервуаров. CO<sub>2</sub>, входящий в состав биогаза, тоже может скапливаться в глубоких выемках при наличии неплотностей в газгольдере и системе коммуникаций; так как он тяжелее воздуха, вызывает опасность удушья.

Возможную опасность представляет собой взрыв газов. Поэтому необходимо предотвращать появление в системе взрывчатой газовой смеси. Пропан и природный газ, а также биогаз в отличие от водорода и окиси углерода образуют с воздухом взрывчатую смесь только в очень узких границах. Следовательно, можно без всякого риска допускать большие — более 25% — добавки воздуха. Естественным, что при этом уменьшаются теплота сгорания.

## Опасность взрыва газгольдера (в результате избыточного давления)

Если газ, находящийся под избыточным давлением, внезапно расширяется (например, в случае дефекта оболочки), — это всегда чревато опасностью. Поэтому не-

обходимо очень внимательно относиться к выполнению инструкций, относящихся к сосудам высокого давления. Для резервуаров низкого давления опасность взрыва чрезвычайно мала. Например, специально в правила техники безопасности при обращении с сосудами, находящимися под давлением (VBG 17), не включены инструкции, касающиеся резервуаров низкого давления для горючих газов, которые служат для бытовых нужд [149]; биогазовые газгольдеры тоже не подходят ни к одному из рассматриваемых там трех классов таких сосудов. Таким образом, правильно следовало бы говорить не биогазовый сосуд, а только биогазовый газгольдер.

С точки зрения применения газа в сельскохозяйственном производстве к биогазовому газгольдеру можно предъявить не слишком обременительное требование: сохранение постоянного минимального давления. Слишком большое предварительное давление можно в каждом отдельном случае регулировать с помощью редукционного клапана. Минимальное рабочее давление должно быть в пределах 0,7...1,0 кПа, чтобы газовые приборы могли работать бесперебойно. Поскольку бактерии производят биогаз независимо от давления в системе, давление газа в газгольдере без дополнительного сжатия может достигать нескольких десятых мегапаскала [87].

Между реактором, газгольдером и потребителями размещается следующая дополнительная аппаратура (см. главу 6): устройство для защиты от обратного удара пламени в виде гравийного фильтра; газоосушитель (для удаления влаги); десульфитатор (для удаления  $H_2S$ ) и в отдельных случаях редукционный клапан.

В принципе биогазовая установка, принадлежащая сельскохозяйственному предприятию, относится прежде всего к компетенции Сельскохозяйственного общества страхователей ФРГ. В правилах по технике безопасности, изданных этим обществом [148], биогазовые установки рассматриваются в разделе 5 (см. приложение 2). Хотя эти регламентации были разработаны еще в 50-е годы, они действительно и сегодня. Чтобы упростить или изменить их, требуется запрос на имя руководства Сельскохозяйственного общества страхователей ФРГ в Касселе, которое должно будет решить вопрос через свой Совет по технике безопасности. Но в любом случае при этом исходят из уже действующих регламентаций

аналогичных профессиональных союзов и организаций, таких, как Профессиональное объединение газо- и водоснабжающих предприятий; Германский союз специалистов по газо- и водоснабжению; Главный союз ремесленных профессиональных обществ; Профессиональное общество химической промышленности; Федеральное общество муниципальных страхователей от несчастных случаев (BAGUV), в ведении которых находятся установки для очистки городских стоков.

Большинство профессиональных обществ применяет для случаев, представляющих общий интерес, одни и те же конкретные регламентации, согласованные в результате обсуждения.

Прежде всего — это правила для предупреждения несчастных случаев: «Газовые предприятия» (VBG 652) — в настоящее время перерабатывается — и «Газы» (VBG 61).

Обе эти инструкции не ориентируются на такие особые случаи, как «Получение биогаза» или «Получение газа в результате брожения». Только в разрабатываемой в настоящее время инструкции № 175 BAGUV («Правила техники безопасности для установок по очистке сточных вод — сооружение и оснащение оборудованием») говорится о специальных установках для получения газа, так что эти регламентации можно использовать для ориентировки [145]. Особенно необходимо отметить следующие пункты упомянутой инструкции:

1. В качестве авторитетных регламентаций в отношении технических вопросов действуют «Правила безопасности при получении газа» Федерального союза специалистов по газо- и водоснабжению (DVGW), а также соответствующие стандарты DIN.
2. Описание устройств для защиты от обратного удара пламени, устанавливаемых между реактором и газгольдером, а также между потребителями и газгольдером.
3. В отличие от регламентаций (DVGW), касающихся получения газа, и стандартов DIN в установках для очистки сточных вод разрешается использовать также пластмассовые трубы (из твердого этилена или ударопрочного поливинилхлорида) для газопроводов.
4. Применение мощных десульфитаторов. В случае слишком высокого содержания серы возникает опасность самовоспламенения при регенерации.



5. Эффективная вентиляция всех помещений.

6. Защита установок от опасности взрыва.

Естественно, необходимо учитывать также все законы и предписания, действующие в ФРГ (например, основные положения по предотвращению взрывов и закон о правилах безопасности при обращении с машинами), которые страховые органы используют как основу при составлении своих инструкций по технике безопасности. В инструкции по технике безопасности, изданной Обществом сельскохозяйственных страхователей, требования не преувеличены. В ней можно отметить следующие пункты (см. приложение 2):

- действительно только для резервуаров вместимостью до 100 м<sup>3</sup>;
- сооружение — по общепринятым техническим правилам. Это означает, например, использование вышеупомянутых «Правил безопасности при получении газа» (DVGW). Уточнять сферу применения этих правил в каждом отдельном случае должно Общество сельскохозяйственных страхователей. До настоящего времени это было невозможно;
- строительство и монтаж выполняет специализированная фирма. Естественно, что подводку газа к потребителю должна производить зарекомендовавшая себя фирма. Однако еще не удалось установить, допустимо ли, например, в данном случае использование пластмассовых трубопроводов, как это разрешается в установках для очистки городских стоков (хотя при других видах общественного газоснабжения их не применяют);
- вентиляционные установки;
- безопасные лампы, применяемые в подземных горных разработках;
- безопасные расстояния от мест получения газа, а также запрещение курения вблизи от них;
- электропроводка, соответствующая взрывоопасным видам производства;
- точные инструкции по эксплуатации.

В соответствии с инструкциями Общества сельскохозяйственных страхователей на биогазовые реакторы вместимостью свыше 100 м<sup>3</sup> распространяются регламентации Федерального союза специалистов по газу и водоснабжению, например, применяется также предписание № 61 «Газы». Для газовых резервуаров низкого

давления вместимостью более 500 м<sup>3</sup> и при рабочем давлении 5 кПа действительны регламентации DVGW G 430, «Предписания по монтажу и эксплуатации газовых резервуаров низкого давления» и G 431 «Предписания по изготовлению газовых резервуаров низкого давления». Однако все эти регламентации не распространяются на простейшие газгольдеры из пластика или емкости из пленки.

В правилах по технике безопасности, изданных Обществом сельскохозяйственных страхователей, отсутствует пункт, запрещающий применение простейших надувных газгольдеров (см. рис. 23). Простое защитное ограждение, препятствующее механическим повреждениям, представляется само собой разумеющимся. Наличие крыши можно считать необязательным требованием. Желательно бы иметь официальное разрешение на использование малых газгольдеров номинальной вместимостью около 25 м<sup>3</sup> и стоимостью 300 марок ФРГ за 1 м<sup>3</sup>. До настоящего времени считалась обычной вместимость газгольдера, равная 0,8...1,5% от ежесуточного выхода газа [79]. При благоприятных условиях эта величина может быть уменьшена (но не в тех случаях, когда несколько реакторов используются попеременно в одной технологической схеме), при неблагоприятных — очевидно, должна быть увеличена.

В соответствии с § 24 Промышленного устава не нужно оформлять официальные документы на сооружение биогазовых установок в хозяйствах. Но для их возведения требуется официальное разрешение строительных властей.

## 6. Подготовка биогаза к использованию

При подготовке биогаза к использованию учитываются в основном три обстоятельства:

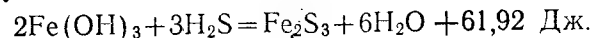
- удаление H<sub>2</sub>S (обессеривание нужно прежде всего для предотвращения коррозии, вызываемой в особенности остаточными продуктами сгорания, и удаления ядовитой части (газовой смеси);
- удаление CO<sub>2</sub> (повышает теплоту сгорания газа и необходимо для его сжижения);
- компримирование и сжижение (при использовании в качестве топлива для тракторов).

Затраты на подготовку газа зависят от его состава, требований потребителя к чистоте газа и от загрузки оборудования.

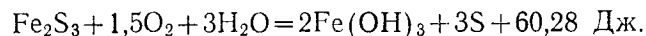
### Обессеривание

Почти все применяемые в химической промышленности методы обессеривания тесно связаны в единую систему и поэтому не могут быть без изменения перенесены в практику биогазовых установок. По нашему мнению, следует исключить из рассмотрения следующие методы: — абсорбционные, в которых  $\text{H}_2\text{S}$  регенерируется как сероводород (углеродный метод, или абсорбция с помощью триэтанолamina); — методы, применяемые при работе с ядовитыми веществами (применение окиси мышьяка); — методы, при которых возникает опасность взрыва из-за образования сероуглерода (адсорбирование активированным углем); — метод Клауса (очень дорогой, восстановление свободной серы).

Таким образом, остается лишь старый каталитический сухой метод с использованием в качестве катализатора  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ . Этот метод можно представить в виде формулы:



Регенерация массы в присутствии воздуха выражается зависимостью:



Известно, что масса катализатора постепенно обогащается серой (максимальная степень обогащения 25%) и что при регенерации высвобождается значительное количество теплоты; это даже может привести к воспламенению сильно обогащенной серой массы (свежая масса имеет коричневую окраску, обогащенная — черную). Стоимость 1 т катализатора — 600 марок ФРГ. Расход массы складывается из количества ее, пошедшего на связывание серы ( $\text{м}^3 \text{ газа} / 24 \text{ ч} \times \text{г серы} / \text{м}^3$ )  $\times 4 = \text{г катализатора} / 24 \text{ ч}$ , и потерь на истирание за один цикл. Обычный расход катализатора при содержании серы 0,1...2,0 г в 1  $\text{м}^3$  биогаза составляет около 120...130 г на 100  $\text{м}^3$  суточной газопroduкции. Промышленность предлагает установки для различной суточной производи-

тельности и различной степени механизации, с отдельными регенеративными колоннами или со встроенными регенеративными камерами и простой коммутацией. Небольшой высокомеханизированный обессериватель батарейного типа для светильного газа при суточном выходе 600  $\text{м}^3$  стоит около 30 тыс. марок ФРГ. Конечно, для установок с небольшим выходом газа можно строить хозяйственным способом примитивные обессериватели, рассчитанные на большие затраты ручного труда (поток газа должен быть всегда направлен снизу вверх), но при этом необходим тщательный ежедневный технический уход!

### Абсорбционная очистка от $\text{CO}_2$

Хотя  $\text{CO}_2$  представляет собой инертный компонент биогаза, снижающий вследствие этого теплоту сгорания, однако он ни в какой мере не препятствует использованию биогаза. Только в крупных установках может понадобиться абсорбционная очистка биогаза от  $\text{CO}_2$ , но это возможно лишь при значительных затратах и будет рациональным и экономичным при очень высоком суточном выходе газа и утилизации удаляемого  $\text{CO}_2$ .

### Компримирование биогаза

В 50-х годах в нескольких биогазовых установках проводили в виде эксперимента сжатие биогаза под высоким давлением, заполняли им баллоны и использовали в качестве моторного топлива для тракторов. В настоящее время это представляется нецелесообразным по двум причинам: из-за большой дополнительной массы баллонов для сжатого газа и высокой стоимости компримирования. Выпускаемые промышленностью 50-литровые баллоны для сжатого газа на номинальное давление 20 МПа имеют массу 65 кг и могут вместить не более 10  $\text{м}^3$  газа, что соответствует 6,2 л дизельного топлива. Для работы трактора мощностью 50 кВт в течение половины смены требуется в среднем 32 л дизельного топлива или пять баллонов со сжатым газом. Если учесть дополнительные крепления, то это составит дополнительную массу не менее 400 кг, которая будет постоянно находиться на тракторе во время его работы. При стоимости этих пяти баллонов 3000 марок

ФРГ, годовых амортизационных отчислениях, равных 18% от этой суммы, и годовой наработке трактора 500 ч дополнительные затраты на 1 м<sup>3</sup> биогаза составляют 0,09 марки ФРГ. Примененис газовых баллонов на меньшее номинальное давление, например баллонов для пропана, нецелесообразно, поскольку в этом варианте нельзя будет обеспечить запас газа, требуемый для бесперебойной работы трактора. Разумеется, баллоны для газа высокого давления подлежат строгому контролю и испытанию, что опять-таки обуславливает дополнительные затраты. Кроме того, приходится учитывать инструкции, касающиеся сжатого газа, так как они распространяются и на передвижные емкости, находящиеся под давлением.

По данным промышленности, сжатие биогаза под высоким давлением экономично только при очень высокой подаче и высокой годовой загрузке компрессорной установки. Самая малопроизводительная установка, которая уже считается неэкономичной в промышленности, стоит:

компрессор высокого давления (50 м<sup>3</sup>/ч при 20 МПа) — около 50 тыс. марок ФРГ  
резервуар для хранения газа (30 м<sup>3</sup>, 4 МПа — 1,5...1,75 марки ФРГ на 1 л)

(в данном случае может не учитываться, поскольку исключает необходимость в газгольдере)  
газонаполнительная установка для двух комплектов по 5 баллонов — около 30 тыс. марок ФРГ  
земельный участок, строение, фундамент, средства техники безопасности, налог, трубопроводы, арматура, монтаж и др. — около 100 тыс. марок ФРГ

Всего около 180 тыс. марок ФРГ

При этом не учитывались затраты на резервный компрессор в случае аварии, как это делают обычно в промышленности, чтобы избежать ущерба при отказе основного агрегата.

Комплект из 12 50-литровых баллонов стоит около 7,5 тыс. марок ФРГ  
Комплект из 28 50-литровых баллонов стоит около 12...14 тыс. марок ФРГ

Ориентировочные годовые расходы на такую установку составляют:

— амортизационные отчисления, уплата процентов, страхование, ремонт, налог — около 18% стоимости установки ~32 тыс. марок ФРГ;

- оплата труда квалифицированного рабочего. Эту специализированную установку должен обслуживать только специалист! (он же может обслуживать и биогазовую установку) ~ 40 тыс. марок ФРГ;
- затраты на энергию — около 0,05 марки ФРГ на 1 м<sup>3</sup> сжимаемого газа;
- при полной загрузке компрессорной установки (около 375 тыс. м<sup>3</sup> в год) стоимость 1 м<sup>3</sup> сжатого биогаза дополнительно возрастает примерно на 0,24 марки ФРГ  
при частичной загрузке (200 тыс. м<sup>3</sup> в год) на 0,41 марки ФРГ  
при частичной загрузке (100 тыс. м<sup>3</sup> в год) на 0,77 марки ФРГ

Таким образом, компримирование биогаза из-за слишком высоких затрат полностью нецелесообразно.

Другой альтернативой можно было бы считать сжижение биогаза при достижении им критического состояния (4,7 МПа, — 82,5 °С) или при нормальном давлении и температуре — 161 °С. Соответствующая комплектная установка для сжижения природного газа (небольшая установка) с производительностью 200 м<sup>3</sup>/ч, по данным промышленности, стоит 2,6 млн. марок ФРГ. При полной ее загрузке 1 м<sup>3</sup> газа обходится дороже на 0,35 марки ФРГ.

К недостаткам «собственной» (т. е. принадлежащей предприятию) компрессорной установки относятся также следующие:

- дополнительная потребность в площади;
- чужеродность по отношению к сельскохозяйственному производству;
- высокие расходы на предусмотренные законом испытания на безопасность — 500 марок ФРГ в сутки;
- необходимость в квалифицированном обслуживающем персонале;
- большие затраты на ремонт и запчасти;
- необходимость аварийного резервирования во избежание значительного возможного ущерба в случае выхода установки из строя;
- дополнительные виды страхования.

## 7. Использование биогаза

В связи с тем, что в дальнейшем изложении мы не будем приводить какие-либо данные по этому вопросу, примем следующие значения (л) среднего выхода биогаза из 1 кг органического сухого вещества:

|                                          |     |
|------------------------------------------|-----|
| навоза крупного рогатого скота . . . . . | 200 |
| свиного навоза . . . . .                 | 300 |
| птичьего помета . . . . .                | 400 |

и количество энергии в 1 м<sup>3</sup> биогаза (содержащего около 60 % метана), равное 22 МДж.

Поскольку речь идет о замене биогазом других энергоносителей, требуемое его количество не может быть просто рассчитано через приведенную величину удельной энергоемкости: в каждом конкретном случае применения газа необходимо учитывать различные коэффициенты полезного действия. Ниже приведены эти значения для типичных случаев использования газа (значительно совпадающие с данными Фельдмана [28]).

Таблица 11. Коэффициенты полезного действия

|                                                | Энергоноситель                     | Коэффициент полезного действия $\eta$ | Дополнительный множитель при замене энергоносителя биогазом |
|------------------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| Для отопительных целей (при полной утилизации) | Кокс, уголь, природный газ, биогаз | 0,6                                   | 0,73                                                        |
|                                                | Светильный газ                     | 0,82                                  | 1,0                                                         |
|                                                | Электрический ток                  | 0,95                                  | 1,16                                                        |
|                                                | Котельное топливо                  | 0,78                                  | 0,95                                                        |
|                                                | Газ                                | 0,28*                                 | 1,0                                                         |
| Для привода энергомашины                       | Дизельное топливо                  | 0,31                                  | 1,13                                                        |
|                                                | Бензин                             | 0,25                                  | 0,9                                                         |
|                                                | Электрический ток                  | 0,85                                  | 3,04                                                        |

\* Фирма Йенбах дает для своих газовых двигателей значение  $\eta = 0,35$ , отнесенное к нижней теплоте сгорания  $Q_H$ .

Конечно, неполная загрузка потребителя существенно снижает общий коэффициент полезного действия. Аналогичные значения этого коэффициента для процессов нагрева или охлаждения будут рассмотрены позднее, но они не столь существенно различаются между собой при использовании электроэнергии или газа и могут быть положены в основу расчета чистого содержания энергии.

В принципе газовые приборы с точки зрения использования первичного энергоносителя значительно экономичнее, чем электроприборы (это обусловлено высокими потерями преобразования при получении электрического тока). Кроме того, в настоящее время разрабатываются отопительные устройства, в которых выпускные газы конденсируются, в результате чего до-

полнительно получается теплота испарения содержащейся в них воды [47], и, следовательно, при расчете баланса энергии можно вместо подставляемой обычно нижней теплоты сгорания  $Q_H$  использовать значение высшей теплоты сгорания  $Q_B$ .

При получении электрического тока с помощью приводимого газовым двигателем генератора справедливо следующее соотношение: 1 м<sup>3</sup> биогаза дает 1,6 кВт·ч электроэнергии. Теплоту воды из системы охлаждения и теплоту, отводимую с выпускными газами, можно в конкретных случаях дополнительно утилизировать (см. раздел 7.2).

## 7.1. Используемые аппаратура и машины

Средняя теплота сгорания биогаза, содержащего около 60% метана, равна 22 МДж/м<sup>3</sup>. Поскольку горючая часть биогаза состоит из метана, его можно причислить к семейству газов «П» (природные газы). И без того очень низкая скорость распространения пламени в метано-воздушной смеси (примерно 43 см/с), характерная для природного газа, при использовании биогаза снижается еще больше из-за высокой доли CO<sub>2</sub> (эта скорость для смеси воздуха и светильного газа равна 65 см/с, для воздушно-водородной смеси — 265 см/с). Метан имеет также самую высокую — около 645°C — температуру воспламенения по сравнению с другими горючими газами. Во всех сферах применения биогаз ведет себя аналогично природному газу, но дает несколько худшие показатели. В стандарте ФРГ DIN 3362 перечислены различные подвергаемые стандартным испытаниям газы, на которые ориентируется промышленность. Так, например, вся аппаратура, рассчитанная на применение любого газа, должна быть приспособлена к работе на перечисленных в стандарте газах или образцовых газовых смесях. Собственно биогаз не входит в этот перечень. Ближе всего он подходит к образцовой газовой смеси 627, состоящей из 82% метана и 18% инертного N<sub>2</sub>. Нижнее значение числа Воббе, которое служит для сравнения взаимозаменяемости газов, составляет для биогаза с теплотой сгорания 22 МДж/м<sup>3</sup> около 24,5. Газы с таким же числом Воббе и равным давлением истечения обычно могут использоваться один вместо другого без замены горелки или форсунки. Правда, этот показатель не ох-

Таблица 12. Соотношение значений теплоты сгорания разн

| Энергоноситель           | Теплота сгорания $Q_{\text{н}}$ (МДж на ед. отпуска) | Биогаз (на 1 м <sup>3</sup> ) с содержанием $\text{CH}_4$ |      |      | Природный газ (на 1 м <sup>3</sup> ) | Светильный газ (на 1 м <sup>3</sup> ) |
|--------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|------|------|--------------------------------------|---------------------------------------|
|                          |                                                      | 56%                                                       | 62%  | 70%  |                                      |                                       |
| Биогаз 56% $\text{CH}_4$ | 20 МДж/м <sup>3</sup>                                | 1                                                         | 0,91 | 0,8  | 0,60                                 | 1,19                                  |
| То же, 62%               | 22,1 МДж/м <sup>3</sup>                              | 1,11                                                      | 1    | 0,88 | 0,66                                 | 1,32                                  |
| » 70%                    | 25 МДж/м <sup>3</sup>                                | 1,25                                                      | 1,13 | 1    | 0,75                                 | 1,48                                  |
| Природный газ «Л»        | 33,5 МДж/м <sup>3</sup>                              | 1,68                                                      | 1,52 | 1,34 | 1                                    | 1,99                                  |
| Светильный газ           | 16,8 МДж/м <sup>3</sup>                              | 0,84                                                      | 0,76 | 0,67 | 0,50                                 | 1                                     |
| Пропан                   | 46 МДж/кг                                            | 2,3                                                       | 2,08 | 1,84 | 1,37                                 | 2,73                                  |
| Котельное топливо        | 36 МДж/л                                             | 1,8                                                       | 1,63 | 1,44 | 1,07                                 | 2,15                                  |
| То же                    | 42,3 МДж/кг                                          | 2,12                                                      | 1,91 | 1,69 | 1,26                                 | 2,52                                  |
| Дизельное топливо        | 36 МДж/л                                             | 1,8                                                       | 1,63 | 1,44 | 1,07                                 | 2,15                                  |
| Бензин                   | 30,5 МДж/л                                           | 1,53                                                      | 1,38 | 1,22 | 0,91                                 | 1,82                                  |
| Кокс                     | 27,6 МДж/кг                                          | 1,38                                                      | 1,25 | 1,1  | 0,82                                 | 1,64                                  |
| Электрический ток        | 3,6 МДж/кВт·ч                                        | 0,18                                                      | 0,16 | 0,14 | 0,11                                 | 0,22                                  |

ватывает такой характеристики, как возможность обратного удара пламени. Наиболее исчерпывающие характеристики горючих газов можно найти в инструкции DVGW G 260.

В общем рабочее давление биогаза должно приближаться к нижней границе минимального давления, необходимого для работы аппаратуры, т. е. примерно к 0,7...1 кПа. Современные сети природного газа работают с давлением у газового прибора 2 кПа. Это означает, что биогаз по сравнению с природным газом обладает несколько худшей способностью к воспламенению, меньшей устойчивостью пламени и поэтому представляет большие трудности при регулировании последнего, например при установке крана на «малый огонь» в кухонных плитах. Пламя в этом случае может срываться в сторону.

Все это соответствует также более ранним исследованиям по использованию биогаза [45]. Теплоту сгорания и рабочее давление можно без особых трудностей поддерживать на относительно постоянном уровне, например с помощью балластного груза в газгольдере или при слишком большом предварительном давлении газа путем включения в магистраль промежуточного газового регулятора. Следовательно, при переходе на биогаз необходимы лишь незначительные изменения в аппаратуре,

энергоносителей (без учета коэффициента полезного действия)

| Пропан (на 1 кг) | Котельное топливо (на 1 л) | Котельное топливо (на 1 кг) | Дизельное топливо (на 1 л) | Бензин (на 1 л) | Кокс (на 1 кг) | Электрический ток (на 1 кВт·ч) |
|------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------|----------------|--------------------------------|
| 0,44             | 0,56                       | 0,47                        | 0,56                       | 0,66            | 0,72           | 5,6                            |
| 0,48             | 0,61                       | 0,52                        | 0,61                       | 0,72            | 0,80           | 6,1                            |
| 0,54             | 0,69                       | 0,59                        | 0,69                       | 0,82            | 0,90           | 6,9                            |
| 0,73             | 0,93                       | 0,79                        | 0,93                       | 1,10            | 1,21           | 9,3                            |
| 0,36             | 0,47                       | 0,40                        | 0,47                       | 0,55            | 0,61           | 4,7                            |
| 1                | 1,28                       | 1,09                        | 1,28                       | 1,50            | 1,66           | 12,8                           |
| 0,78             | 1                          | 0,85                        | 1                          | 1,18            | 1,30           | 10,0                           |
| 0,92             | 1,17                       | 1                           | 1,17                       | 1,39            | 1,51           | 11,7                           |
| 0,78             | 1                          | 0,85                        | 1                          | 1,18            | 1,30           | 10,0                           |
| 0,66             | 0,85                       | 0,72                        | 0,85                       | 1               | 1,10           | 8,50                           |
| 0,60             | 0,77                       | 0,65                        | 0,77                       | 0,90            | 1              | 7,70                           |
| 0,07             | 0,1                        | 0,08                        | 0,1                        | 0,12            | 0,13           | 1                              |

чтобы приспособить ее к метану (например, замена форсунок), но в принципе не существует сколько-нибудь серьезных проблем при использовании биогаза в аппаратуре для природного газа. Первые переговоры с изготовителями газоаппаратуры подтвердили это мнение, несмотря даже на отсутствие опыта применения биогаза в традиционных газовых приборах. В ближайшее время несколько фирм собираются провести испытания в целях подтверждения гипотез о горючих свойствах биогаза. Поэтому цены на биогазовую аппаратуру в значительной мере будут аналогичны ценам на приборы для природного газа. Из-за небольших переналадок и отсутствия крупносерийного выпуска они могут быть даже несколько более высокими.

Для сравнения биогаза с другими видами топлива по их теплоте сгорания и стоимости можно воспользоваться данными диаграммы (рис. 24) и таблицы 12[24]. Если стоимость производства биогаза относится к удельной стоимости других энергоносителей так же, как соответствующие значения энергии в единицах, принятых при ее отпуске, то цену биогаза можно считать приемлемой с экономической точки зрения.

Коммуникации между газовыми приборами должны устанавливать квалифицированные специалисты с учетом «Технических правил монтажа газопроводов»

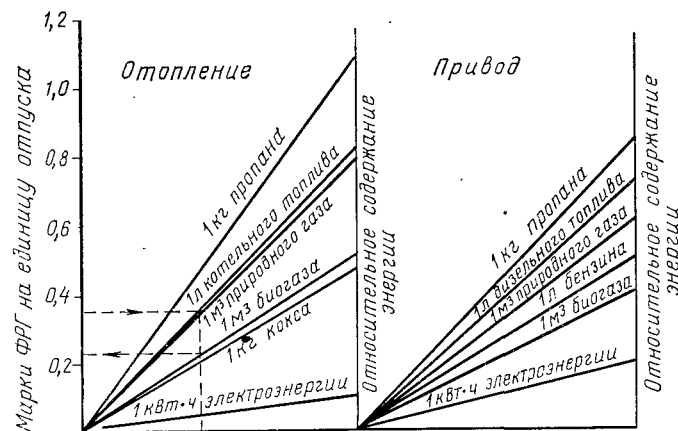


Рис. 24. Диаграмма сравнения стоимости биогаза со стоимостью других видов топлива [24] (например, при цене котельного топлива 0,35 марки ФРГ за 1 л, включая затраты на тару, стоимость равного по удельной энергетической ценности количества биогаза будет составлять лишь около 0,24 марки ФРГ за 1 м³).

(TRGI). Газовые приборы должны удовлетворять требованиям «Закона о технических средствах труда» (закон о защитных устройствах для машин) с приложением А и В. Для большинства газовых приборов уже изданы стандарты DIN или инструкции по эксплуатации (DVGW—VFG).

По поводу отдельных приборов, в которых можно использовать биогаз, необходимо сказать следующее.

**Горелка для отопительных установок.** Используется в системе отопления жилых помещений как в виде обычных горелок с забором атмосферного воздуха, так и в виде горелки с дутьем, кроме того, для подогрева воздуха в различных сушилках, кондиционирования воздуха в помещениях и в винокурном производстве. Некоторые предприниматели уже используют горелки на газе, получаемом при очистке сточных вод (например, для отопления общественных плавательных бассейнов) как с забором атмосферного воздуха, так и с подачей воздуха под давлением. В принципе здесь не ожидаются какие-либо трудности, если использовать аппаратуру в варианте для природного газа. Другие фирмы готовы провести исследования процессов горе-

ния биогаза, чтобы соответствующим образом приспособить свои горелки к переходу на этот вид топлива. Из-за меньшей, чем у природного газа, скорости горения в газовых котлах, очевидно, следует несколько уменьшить нагрузку горелок во избежание срыва пламени. Поэтому максимальные значения тепловой мощности горелок будут несколько ниже. Для нормальной работы горелок с дутьем требуется давление истечения газа на входе в горелку порядка 1...1,5 кПа. Это не приведет к существенному удорожанию аппаратуры. Серийный выпуск аппаратуры для биогаза требует специального разрешения DVGW. Впрочем промышленность уже поставляет двухтопливные горелки для работы как на газе, так и на котельном топливе.

**Водонагреватели.** Здесь не следует ожидать каких-либо трудностей в эксплуатации. Так называемые универсальные газовые приборы подходят для работы на всех перечисленных в стандарте DIN 3362 газах и газовых смесях.

**Газовые плиты с горелками на верхней поверхности и с духовками.** Здесь тоже идет речь в общем об использовании «универсальных» газовых приборов. При использовании биогаза в духовках никаких трудностей не предвидится. Часть предпринимателей придерживаются мнения, что кухонные газовые плиты должны работать на биогазе с теплотой сгорания  $\geq 22$  МДж/м³ и рабочем давлении 0,4 кПа при условии переделки горелок для получения так называемого ползущего пламени. Это позволит обеспечить работу плиты с открытыми горелками в положении «малый огонь». Другие изготовители считают, что давление газа должно быть не менее 0,75...0,8 кПа, иначе вследствие недостаточного подсоса воздуха нельзя гарантировать полное сгорание в соответствии с гигиеническими требованиями. Такое давление можно обеспечить в любом случае. Как следует из приведенных выше данных, использование газовых приборов с давлением до 5 кПа (в пропановых установках) не представляет каких-либо затруднений. Представляется целесообразным выбрать единое базовое значение предварительного давления газа, на которое могут ориентироваться все фирмы-изготовители при конструировании биогазовой аппаратуры. В противном случае придется устанавливать газовые редукторы, что связано с неоправданным удорожанием аппаратуры.

**Холодильные установки.** Здесь речь идет о холодильных машинах абсорбционного типа. Будет изготавливаться «универсальная» газовая аппаратура. Необходимо провести соответствующие эксперименты с биогазом. Компрессорных установок малой мощности, приводимых в действие газовым двигателем, пока не существует. Принципиальных трудностей при создании соответствующих газовых двигателей не должно возникнуть, хотя вряд ли возможно крупносерийное производство двигателей для упомянутых небольших мощностей. Проблемы могут появиться при разработке автоматического пуска (см. также раздел 7. 2). Сейчас ведутся работы по проектированию абсорбционных тепловых насосов с непосредственным использованием газа для подогрева. Такие насосы задуманы как для тепло-, так и для холодооборудования климатических установок [113, 114].

**Инфракрасные излучатели.** Все инфракрасные излучатели подлежат обязательной приемке соответствующими институтами, занимающимися проблемами использования горючих газов, и пользоваться ими можно лишь с ведома DVGW. Один из изготовителей «универсальных» газовых излучателей считает, что путем замены нагреваемой газом керамической пластины и форсунки можно обеспечить удовлетворительную работу прибора на биогазе. Другие предприниматели придерживаются мнения, что инфракрасные излучатели, предназначенные для использования сжиженного газа, на биогазе работать не будут, так как эти излучатели рассчитаны на маленькое пламя и высокие скорости горения, а это принципиально не подходит для биогаза. В подобной ситуации только опыты по практическому использованию биогаза могут дать достоверную информацию о необходимости тех или иных изменений вплоть до переделки конструкции горелки. Самый важный критерий для получения разрешения DVGW на использование биогазовых инфракрасных излучателей — это отсутствие СО в газообразных продуктах сгорания. В принципе «универсальные» газовые инфракрасные излучатели должны быть пригодными для этой цели. Предложенное ранее решение — использовать для зажигания горелки сжиженный газ, а затем переключать ее на питание биогазом — представляется нежелательным.

**Стационарные двигатели внутреннего сгорания.** Опыт работы с газовыми двигателями, использующими био-

газ в качестве топлива, имеется на различных предприятиях по очистке стоков, где двигатели служат для привода вентиляционных установок и генераторов, как правило, большой мощности.

В других местах также применяют стационарные или автомобильные двигатели, работающие на пропане или метане.

Фирмы-изготовители газовых двигателей:

Генбахер верке, Генбах-Австрия (серийный выпуск газовых двигателей эффективной мощностью 30...2200 кВт);  
Машиненверке, Манхейм (серийные двигатели на 65...1200 кВт);

Машиненфабрик, Аугсбург-Нюрнберг (двигатели на природном газе мощностью 99...130 кВт);

Даймлер-Бенц, Штутгарт (двигатель на природном газе M 407 hG);

Фордверке (15...36 кВт, сконструированный для небольших нагрузок).

В 50-е годы многие сельскохозяйственные тракторы работали на сжатом (до 35 МПа) биогазе, помещавшемся в баллонах [108]. Высокое сжатие газа необходимо для перевозки его на тракторе, чтобы можно было запасать в баллонах необходимое количество этого топлива. Но такое применение биогаза неэкономично, во-первых, из-за необходимости в многоступенчатой компрессорной установке, во-вторых, из-за очень жестких требований к технике безопасности (см. также главу 6). Это значит, что сегодня речь может идти о применении газа только в стационарном газовом двигателе низкого давления, например для привода вентиляторов, насосов, транспортеров, генераторов и др. Для уменьшения повреждений от коррозии необходимо удалять  $H_2S$ .

Биогаз имеет октановое число 100...110 ( $ROZ > 100$ ;  $CZ < 10$ ; метановое число 135), т. е. он хорошо подходит для двигателей с высокой степенью сжатия, но обладает очень низкой способностью к самовоспламенению. Обычная степень сжатия — от 8 до 11.

В основном речь может идти об использовании газа в одном из двух циклов сгорания, характерных для газовых двигателей: в газовом цикле Отто (с искровым зажиганием) и газодизельном цикле (с впрыскиванием небольшой дозы запального дизельного топлива).

Обычные двигатели, работающие по циклу Отто (карбюраторные двигатели), относительно легко пере-

вести на газ: достаточно лишь заменить карбюратор на смеситель (так переоборудуют в отдельных случаях двигатели легковых и малых грузовых автомобилей).

Газодизельный цикл осуществляется без принудительного зажигания. Около 10..15% необходимого полного топливного заряда впрыскивается в виде дизельного топлива в цилиндр для воспламенения топливозвоздушной смеси, поскольку точка воспламенения газозвоздушной смеси выше точки воспламенения распыленного дизельного топлива. Если не имеется достаточного количества биогаза, можно воспользоваться вариантами работы с переменной цикла по газодизельному или чисто дизельному циклу. Однако следует отметить, что самый экономичный из них — газовый цикл Отто.

При переводе дизелей, например от старых тракторов, на газовое топливо рекомендуется (по данным промышленности) проделать следующие операции.

#### При переводе на газовый цикл Отто:

- заменить головку цилиндров и свечи;
- поставить новые поршни, обеспечивающие уменьшение степени сжатия и изменение конфигурации камеры сгорания;
- снять топливный насос;
- снять механизм опережения подачи топлива;
- поставить новый корпус привода для регулятора и прерывателя-распределителя зажигания;
- поставить новый газовый смеситель, который обычно монтируется на всасывающем патрубке дизеля и представляет собой простой смеситель с дроссельной заслонкой;
- установить перед газовым смесителем газовый редуктор (регулятор давления газа);
- поставить новый предельный регулятор частоты вращения, предотвращающий разнос двигателя посредством дополнительной дроссельной заслонки во всасывающем патрубке;
- поставить новую систему зажигания (бобину, прерыватель-распределитель, провода, свечи).

#### При переводе на газодизельный цикл:

- заменить поршни, обеспечивая изменение степени сжатия;
- поставить новый смеситель;
- установить новые регулирующие органы (на впускном и выпускном патрубках);

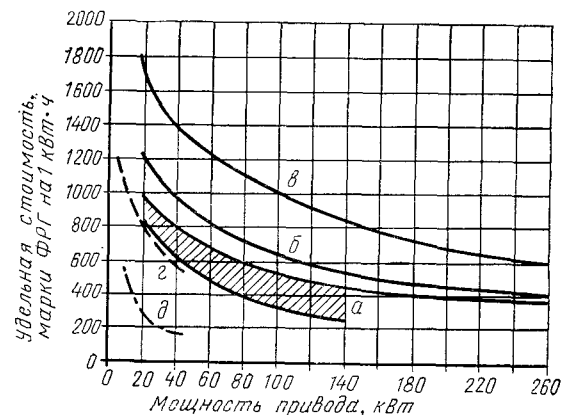


Рис. 25. Средние значения удельной стоимости:

а — газовый двигатель; б — газовый двигатель с устройством для утилизации теплоты; в — газовый двигатель с устройством для утилизации теплоты и генератором; г — аварийный дизель-генератор; д — газовый двигатель, работающий по циклу Отто (а, б, в, — для длительной работы).

- поставить новый газовый редуктор, гарантирующий постоянное предварительное давление газа.

Переоборудование дизелей, например от старых тракторов, используемых на стационаре, тоже возможно, но до сих пор ни одна из фирм не выпускает необходимые для этого наборы деталей. Интерес к производству таких наборов может появиться лишь при увеличении возможностей их сбыта, в противном случае от этого варианта придется отказаться в пользу новых специализированных газовых двигателей. Естественно, что переоборудование возможно лишь в больших, хорошо оснащенных специальных мастерских или на заводах самой фирмы-изготовителя. Затраты на переоборудование пока еще не определены.

Перевод на газ влечет за собой уменьшение мощности двигателей. Соответствующие цифровые показатели несколько колеблются и достигают в сумме 30% (с дизельного на природный газ — около 20%; с природного газа на биогаз — около 10%). Минимально допустимое давление истечения биогаза, поступающего в двигатель, должно быть не меньше 0,4 кПа. Удельный расход топлива при работе на биогазе (60% метана) при полной загрузке двигателя составляет около 0,65 м<sup>3</sup>/(кВт·ч). Исходя из этого, для непрерывной ра-



боты двигателя мощностью 50 кВт требуется 32,5 м<sup>3</sup> биогаза в час, а при средней загрузке — около 60 м<sup>3</sup> на половину смены. 1 м<sup>3</sup> биогаза соответствует примерно 0,5 кг дизельного топлива. Чистота биогаза способствует существенному уменьшению износа двигателя по сравнению с работой по дизельному циклу. По имеющимся данным, ежегодные расходы на техническое обслуживание и ремонт газовых двигателей составляют около 1 % от их стоимости.

**Получение электроэнергии с помощью стационарных газовых двигателей.** Все чаще указывается на возможность использовать излишки биогаза из средних и малых установок для получения электроэнергии с помощью газовых двигателей. Для этой цели промышленность ФРГ (например, фирмы Йенбахер верке, Maschinenверке-Манхейм) предлагает комплектные установки из газовых двигателей и генераторов на электрическую мощность 30...220 кВА. Насколько экономично такое получение электроэнергии, можно сказать, лишь проведя точный расчет затрат на производство 1 кВт·ч. В качестве нижней границы мощности агрегатов для рационального получения электроэнергии таким способом неоднократно называлась цифра 100 кВА. На рисунке 25 приведены значения средней удельной стоимости газовых двигателей и комплектных агрегатов, включающих в себя устройства для утилизации теплоты. С помощью этих данных можно проводить ориентировочные расчеты затрат.

Если допустить, что 1 м<sup>3</sup> биогаза в зависимости от КПД дает 1,6...1,9 кВт·ч электроэнергии, стоимость 1 кВт·ч сразу же возрастает на величину, равную 52...65 % стоимости получения 1 м<sup>3</sup> биогаза. Сюда прибавляется часть стоимости агрегата (газовый двигатель и электрогенератор), равная в зависимости от его годовой загрузки 0,02...0,07 марки ФРГ на 1 кВт·ч, а также часть расходов на оплату труда обслуживающего персонала и возможные расходы на резервный источник энергии, предоставляемый энергоснабжающей организацией. Использование отбросной теплоты двигателя, позволяющее повысить общий КПД установки до 70 %, несколько снижает затраты. (Более подробно об этом см. в разделе 7.2.) В каждом конкретном случае следует оговорить с энергоснабжающей организацией расход вырабатываемой

электроэнергии на собственные нужды и частичную отдачу ее в общественную энергосеть (параллельное использование энергии), а также виды и формы применения получаемой электроэнергии.

Возможны следующие варианты использования энергии.

1. Стопроцентная передача ее энергоснабжающей организации для питания общественной энергосети (аналогично гидроэлектростанции). Соответствующий тариф в настоящее время составляет 0,05 марки ФРГ за 1 кВт·ч. Собственные потребности хозяйства в электроэнергии полностью покрываются, как обычно, энергоснабжающей организацией. Такие небольшие поставщики электроэнергии не очень ценятся энергоснабжающими организациями из-за трудностей регулирования сети.
2. Автономное производство. Полное обеспечение собственной электроэнергией. Никакого резервирования со стороны энергоснабжающей организации. При этом, однако, бывает трудно приспособиться к изменяющимся потребностям хозяйства в электроэнергии. При авариях или недостаточном выходе газа производство обесточивается.
3. Обеспечение собственной электроэнергией или частичное обеспечение своей энергией с аварийным резервированием за счет энергоснабжающей организации. В связи с необходимостью заключения специального контракта это резервирование должно обойтись относительно дорого.

Отсюда следует, что производство электроэнергии из биогаза если и может быть целесообразным, то лишь при продолжительной эксплуатации генераторной установки. Однако для этого необходимо располагать соответствующим количеством газа (табл. 13). Производство электроэнергии для собственных нужд при хуторской системе и отсутствии общественных энергосетей необходимо оценивать иным образом.

## **7.2. Объединенная выработка тепловой и механической энергии**

Здесь речь идет об одновременном использовании механической энергии (например, вала турбины или двигателя) и возникающей при ее производстве тепловой

Таблица 13. Количество газа, необходимое для производства электроэнергии

|                                                                                                                   | Мощность генератора, кВт |       |       |        |        |        |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|-------|-------|--------|--------|--------|
|                                                                                                                   | 30                       |       | 100   |        | 200    |        |
| Годовая загрузка в часах (равномерно распределяемая на весь год)                                                  | 3 000                    | 6 000 | 3 000 | 6 000  | 3 000  | 6 000  |
| Необходимое количество газа, м³/сут                                                                               | 160                      | 320   | 540   | 1 080  | 1 080  | 2 160  |
| Энергия, полезно используемая для отопления (при объединенной выработке механической и тепловой энергии), МДж/сут | 1 900                    | 3 800 | 6 600 | 13 200 | 13 200 | 26 400 |

энергии (отбросной теплоты), например, при выработке электроэнергии на электростанциях утилизации отбросной теплоты для отопительных целей. В промышленности этот принцип используется все более и более широко, чтобы таким образом повысить КПД преобразования первичной энергии [3, 97].

В связи с использованием биогаза возникают возможности объединенной выработки тепловой и механической энергии там, где биогаз применяется для привода газовых двигателей. Двигатели используют эффективно в среднем около 30% энергии топлива, например, для привода вентиляторов, тепловых насосов, генераторов (производство электроэнергии). По меньшей мере около 70% отбросной теплоты, выделяемой в систему охлаждения, в виде излучения и с газообразными продуктами сгорания, можно снова использовать в различных полезных целях.

**Объединенная выработка тепловой и механической энергии в установках для привода вентиляторов**

Относительно простое сочетание выработки различных видов энергии возможно в установках, состоящих из газовых двигателей и вентиляторов. Такое сочетание применяется для различных сельскохозяйственных сушилок. При очень небольших потерях на излучение

(примерно 10 %) оставшая часть отбросной теплоты (60 % энергии топлива) может быть использована для подогрева воздушного потока — к нему можно примешивать воздух, охлаждающий двигатель, и отработавшие газы. Уже в наши дни эксплуатируются сушилки, использующие сжиженный газ для непосредственного подогрева воздуха без теплообменников. В соответствии с результатами новейших исследований и данными более ранних экспериментов [43] при использовании для непосредственного подогрева воздуха котельного топлива, оцениваемого ниже, чем газ, можно не опасаться вредных воздействий на объект сушки при условии, что будут приняты соответствующие меры предосторожности.

Таблица 14. Потребность в биогазе для привода вентилятора с помощью газового двигателя и возможности подогрева воздуха за счет отбросной теплоты

| Мощность привода, кВт | Подача вентилятора, м³ ч при давлении |         | Расход биогаза на привод, м³ ч | Возможный подогрев воздуха за счет отбросной теплоты, °C |
|-----------------------|---------------------------------------|---------|--------------------------------|----------------------------------------------------------|
|                       | 4) Па                                 | 6) Па   |                                |                                                          |
| 10                    | 44 000                                | 36 000  | 6,5                            | 2,5...3,0                                                |
| 20                    | 68 000                                | 58 000  | 13,0                           | 3,1...3,7                                                |
| 30                    | 93 000                                | 82 000  | 19,5                           | 3,4...3,9                                                |
| 50                    | 142 000                               | 125 000 | 32,5                           | 3,8...4,3                                                |

Данные о возможностях подогрева воздуха путем использования отбросной теплоты приводного двигателя и вентилятора можно взять из таблицы 14. Эти возможности не очень велики даже при большой подаче воздуха, но они соответствуют обычным для сушки сена значениям температуры 3...4°C. Следует отметить, что таким способом биогаз можно использовать только в течение короткого отрезка времени (определяемого сезонностью), правда, с очень высоким КПД. Вопрос о возможности использования газового теплового насоса, который мог бы найти себе применение в зимний период для отопления жилищ, нуждается в более подробном исследовании.

## Объединенная выработка тепловой и механической энергии при использовании тепловых насосов

Принцип действия теплового насоса известен очень давно. Он не производит теплоту, но поднимает содержащуюся в воздухе, воде и почве теплоту, а также самые различные формы отбросной теплоты на более высокий температурный уровень, так что ее можно использовать снова. Для привода теплового насоса необходима механическая (компрессионный тепловой насос) или тепловая (абсорбционный тепловой насос) энергия. В обоих случаях можно использовать биогаз.

Устройству (рис. 26) и применению теплового насоса посвящены многочисленные работы [33, 96, 127, 128, 129]. Принципиально возможные способы его применения в сельском хозяйстве подробно исследованы Ортом [81]. Применение теплового насоса тем целесообразнее, чем выше коэффициент трансформации  $\epsilon$ . Последний зависит от разности температур предварительного нагрева (конденсатор) и окружающей среды (испаритель), уменьшаясь с увеличением этой разности, а также от конкретной системы теплового насоса.

В качестве средних значений коэффициента тран-

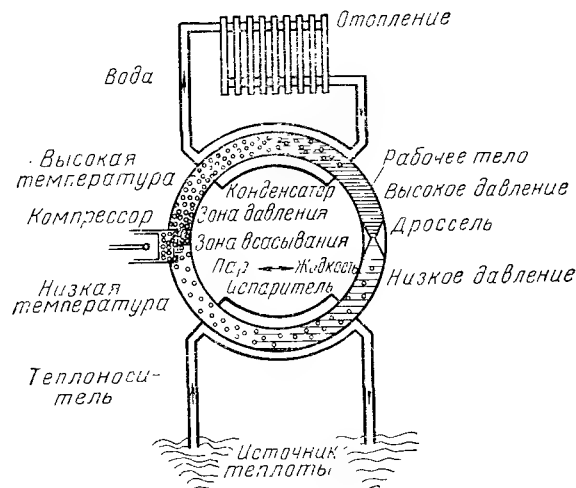


Рис. 26. Схема циркуляционного контура теплового насоса [128].

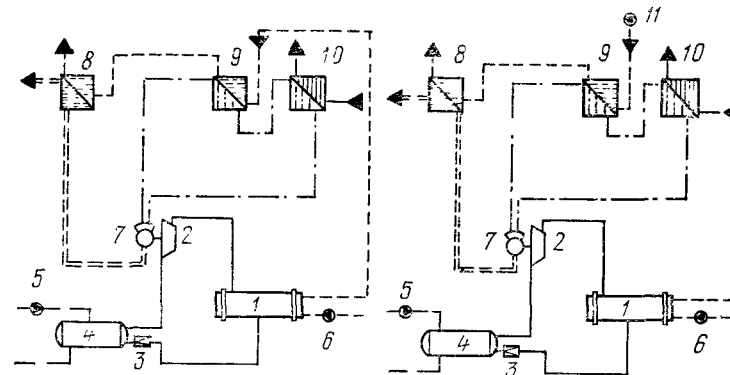


Рис. 27. Схема объединенной выработки тепловой и механической энергии при работе газового двигателя с тепловым насосом (Зульцер-Эшер Висс):

1 — конденсатор; 2 — компрессор; 3 — автоматическая регулировочная станция; 4 — испаритель для охлаждения воды; 5 — водяной насос испарителя; 6 — водяной насос конденсатора; 7 — газовый двигатель привода; 8 — котел-утилизатор; 9 — теплообменник: охлаждающая вода — горячая вода; 10 — теплообменник: охлаждающая вода — свежая вода; 11 — насос горячей воды.

сформации тепловых насосов  $\epsilon$  можно привести следующие:

| Схема передачи тепла               | $\epsilon$ |
|------------------------------------|------------|
| Воздух — воздух . . . . .          | 2,5        |
| Воздух — вода . . . . .            | 2,5        |
| Почва — вода . . . . .             | 3,0        |
| Вода — вода . . . . .              | 4,0        |
| Отбросная теплота — вода . . . . . | До 6,0     |

Привод теплового насоса газовым двигателем благодаря возможности объединенной выработки тепловой и механической энергии, т. е. максимальной утилизации высокотемпературной отбросной теплоты двигателя, например в общем или отдельном цикле горячей воды (рис. 27), обеспечивает значительно лучшее использование первичной энергии, чем в обычном отопительном котле или электротепловом насосе. Максимально возможная величина использования первичной энергии зависит от достигнутого коэффициента трансформации. Бейер [12] приводит для теплового насоса, работающего по схеме передачи тепла «воздух—вода», такие значения полезно используемой тепловой энергии (табл. 15).

Таблица 15. Сравнительные балансы энергии для различных тепловых насосов, работающих по схеме «воздух — вода», %

|                                           | Первичная энергия | Полученная полезная теплота | Количество первичной энергии, необходимое для получения 100% полезной тепловой энергии |
|-------------------------------------------|-------------------|-----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| Классический отопительный котел (на газе) | 100               | 75                          | 133                                                                                    |
| Электротепловой насос                     | 100               | 97                          | 103                                                                                    |
| Газокомпрессионный тепловой насос         | 100               | 179                         | 56                                                                                     |
| Газоабсорбционный тепловой насос          | 100               | 120                         | 83                                                                                     |

Соответствующие схемы превращения энергии показаны на рисунке 28.

Газокомпрессионный тепловой насос при объединенной выработке тепловой и механической энергии дает наивысшую экономию первичной энергии. По сравнению с электротепловым насосом он обладает следующими основными преимуществами [12]:

- дополнительное получение теплоты, составляющей примерно 58% от теплоты двигателя;
- возможность конденсации при более низких температурах и, как следствие, более высокие коэффициенты трансформации благодаря использованию отбросной теплоты;
- возможность экономичной работы без дополнительного подогрева при наружной температуре воздуха ниже 0°C;
- для получения того же количества полезно используемой теплоты требуется менее мощный тепловой насос (как правило, на 30...50%);
- при работе с обычным безопасным хладагентом R 22 можно достичь температуры горячей воды 55°C, что пригодно только для панельного отопления полов. При использовании теплоты двигателя эту температуру можно поднять до 90°C, что позволяет применять обычные радиаторы;
- бесступенчатое регулирование мощности путем изменения частоты вращения вала двигателя в интер-

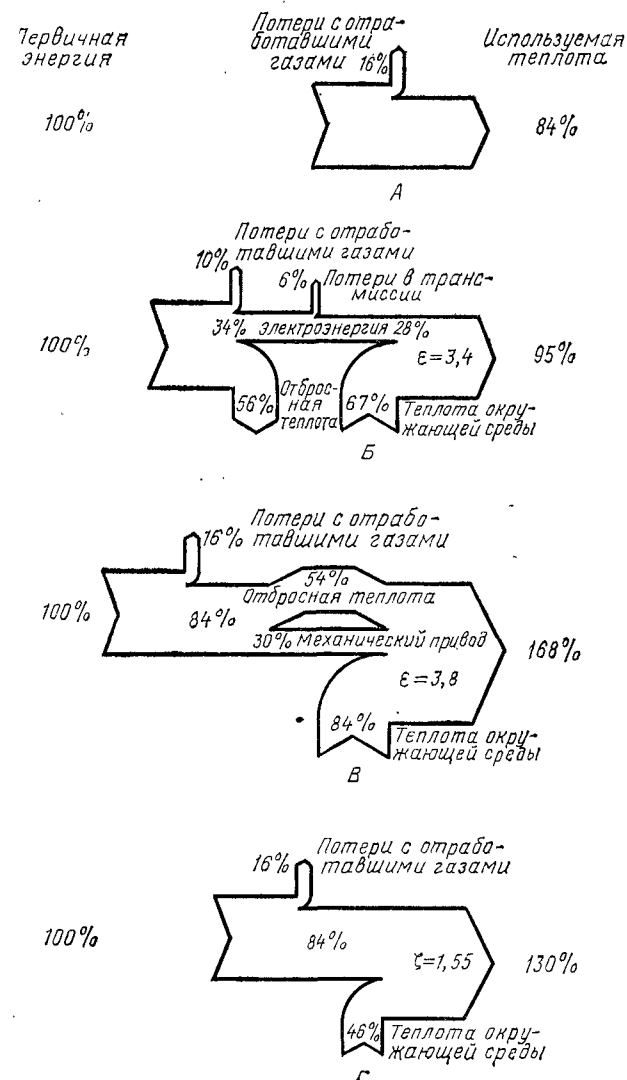


Рис. 28. Схема превращения энергии в тепловых насосах [114]:

А — газовый отопительный котел; Б — электрокомпрессионный тепловой насос; В — газокомпрессионный тепловой насос; Г — газоабсорбционный тепловой насос.

Таблица 16. Сравнение общих годовых затрат при различных способах отопления ( $Q_0=20$  кВт, число часов работы в году 1800), марок ФРГ [96]

|                                                    | Отопление жидким топливом | Газовое отопление | Электротепловой насос |                        |                      | Газовый тепловой насос |
|----------------------------------------------------|---------------------------|-------------------|-----------------------|------------------------|----------------------|------------------------|
|                                                    |                           |                   | одноконтурный         | двухконтурный          |                      |                        |
|                                                    |                           |                   |                       | параллельного действия | поперечного действия |                        |
| Инвестиционные вложения                            | 12 000                    | 5 000             | 17 000                | 11 200                 | 15 700               | 15 000                 |
| в том числе стоимость агрегата                     | 7 000                     | 3 000             | 17 000                | 8 200                  | 8 200                | 13 000                 |
| стоимость строительных материалов                  | 5 000                     | 2 000             | —                     | 1 000                  | 4 500                | 2 000                  |
| Капитальные затраты                                | 1 226                     | 469               | 2 533                 | 1 487                  | 1 992                | 2 100                  |
| Затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание | 400                       | 200               | 520                   | 460                    | 660                  | 800                    |
| Стоимость энергии                                  | 1 744                     | 1 970             | 2 260                 | 2 230                  | 1 340                | 1 000                  |
| Полные годовые затраты                             | 3 370                     | 2 639             | 5 313                 | 4 177                  | 3 992                | 3 900                  |

вале 900...1500 мин<sup>-1</sup>. Дополнительное регулирование возможно путем изменения открытия клапанов компрессора, в результате чего можно плавно регулировать мощность от 100 до 15%. Электротепловой насос можно регулировать только ступенчатым переключением, так как электродвигатели с плавным регулированием частоты вращения (например, двигатели с фазным ротором) значительно дороже и вызывают дополнительные трудности при подсоединении.

Несмотря на большую экономию первичной энергии, газокompрессионный тепловой насос может конкурировать с другими отопительными системами лишь тогда, когда обеспечивается как его рентабельность, так и надежность в эксплуатации. На рентабельность существенно влияет соотношение стоимостей энергии (например, электроэнергии, котельного топлива), а также первоначальные затраты. При возможном в будущем переходе на серийный выпуск этого теплового насоса следует ожидать дополнительного снижения затрат. При теоретическом расчете затрат для потребности в энергии 20 кВт (табл. 16) наиболее благоприятным представляется вариант с газовым тепловым насосом [96]. Несколько отпугивают от него, возможно, довольно высокие первоначальные затраты.

Газокompрессионные тепловые насосы с мощностью привода 30 кВт и соответственно тепловой мощностью 450 ... 650 МДж/ч (125 ... 175 кВт) с доработанными конструктивно двигателями уже серийно выпускаются промышленностью: первые установки поступили в эксплуатацию. Полные годовые затраты на эти установки будут меньше, чем на обычные отопительные агрегаты (Бейер [12]). Опыт показывает, что поступившие в эксплуатацию в ФРГ газовые двигатели обладают высокой надежностью. Для некоторых из них фирмы-изготовители дают гарантии на несколько лет. Расход биогаза при работе на полной мощности должен составлять около 20 м<sup>3</sup>/ч.

В принципе газокompрессионные тепловые насосы тепловой мощностью свыше 175 кВт (мощность привода 30 кВт соответствует 150 тыс. ккал/ч) при нынешнем уровне техники можно конструировать из обычных компонентов. Установки тепловой мощностью до 4000 кВт (мощность привода 700 кВт) уже находятся в эксплуатации [12, 88]. Однако необходимы новые конструктивные разработки, если предполагается использовать для отопления многоквартирных домов небольшие газовые тепловые насосы, которые должны быть также просты в эксплуатации, как традиционные системы отопления, а по рентабельности превосходить их. В этом плане пока отсутствуют удовлетворительные технические решения (например, по таким параметрам, как бесшумность работы, отсутствие вибраций, компактность, простая регулировка, легкость в обслуживании, надежность в эксплуатации). В настоящее время фирмы Рургаз, Ауди НСУ и Фольксваген при поддержке правительства ФРГ ведут совместную работу по решению этих проблем [88], и можно ожидать, что в недалеком будущем им удастся найти ответы на поставленные вопросы. Фирма Рургаз эксплуатирует газовые тепловые насосы (воздух—вода) на серийных легковых автомобилях (Поло, Пассат), где например, два цилиндра используются для привода и два — в качестве компрессоров. Именно в сельском хозяйстве эти газовые тепловые насосы малой мощности могли бы найти себе применение. Допустимо также использование газового теплового насоса в системе рециркуляции воздуха сушилок для зерна и сена. Обычные зерновые сушилки порционного и непрерывного действия имеют производительность

1...2 т/ч при установленной тепловой мощности 80...160 кВт. При хорошей загрузке их можно использовать в течение 800 ч за летний сезон.

Объединенная выработка тепловой и механической энергии при производстве электроэнергии

При производстве электроэнергии из биогаза в электрической ток преобразуется лишь около 30% его энергоресурса, а остальная часть представляет собой отбросную теплоту. 55...60% этого ресурса теоретически можно также использовать с помощью теплообменника и котла-утилизатора, конечно, с соответствующими техническими и финансовыми затратами. Средние значения финансовых затрат пока еще назвать нельзя. В таблице 13 приведены значения полезно используемой теплоты, которую можно дополнительно получить при эксплуатации электрогенераторов соответствующей мощности. Эту теплоту можно будет использовать в сельскохозяйственном производстве для следующих целей:

- подогрева воды для бытовых нужд и содержания скота;
- отопления жилых помещений;
- подогрева воздуха для сушилок (см. Объединенное получение тепловой и механической энергии в установках для привода вентиляторов) или создания нужного микроклимата в животноводческих помещениях;
- для создания необходимой температуры брожения в биогазовых реакторах;
- отопления теплиц.

Как правило, поголовье скота в течение года остается постоянным, поэтому можно рассчитывать на постоянное количество получаемых из биогаза электроэнергии и дополнительной теплоты. Однако проблема всегда состоит в том, чтобы рационально и равномерно использовать как электроэнергию, так и теплоту, причем тем в большей степени, чем меньше установка. Даже небольшое количество неутраченной энергии удорожает стоимость единицы полезно используемой энергии. В каждом конкретном случае предприятие должно иметь диаграмму предполагаемого выхода биогаза по месяцам года и соответствующее распределение потребностей в электроэнергии и теплоте, на базе которых составля-

ются рекомендации по утилизации получаемых в течение планируемого периода избытков энергии или покрытия возникающих за это же время дополнительных потребностей в ней.

На рисунке 29 приведена соответствующая диаграмма для предприятия по очистке городских стоков [3] населенного пункта, насчитывающего 140 тыс. жителей (по общей массе стоков соответствует приблизительно 5 тыс. усл. гол. крупного рогатого скота). Как видно из рисунка, возможная выработка электроэнергии всегда выше, чем собственная потребность предприятия в ней. При этом выход теплоты в течение десяти месяцев года также превышает собственные потребности предприятия. Проведем сравнительный расчет затрат для трех вариантов.

- А. Потребность в электроэнергии на 100% удовлетворяет энергоснабжающая организация; теплоснабжение обеспечивает отопительный котел, работающий на выделяющемся при очистке стоков газе; излишек газа сжигается в факелах ( $\sim 60\%$ ).
- Б. Самообеспечение электроэнергией ( $1 \times 660$  кВт) при 100%-ном резервировании за счет энергоснабжающей организации; для выравнивания суточных колебаний в электроэнергии используется газгольдер; покрытие основных потребностей в теплоте за счет отбросной теплоты газовых двигателей, пиковых потребностей — за счет отбросной теплоты котла-утилизатора, работающего на биогазе; сжигание избытков газа в факелах ( $\sim 20\%$ ).
- В. Самообеспечение электроэнергией ( $3 \times 330$  кВт) при 50%-ном резервировании за счет энергоснабжающей организации; для выравнивания суточных колебаний используется газгольдер; покрытие основных потребностей в теплоте за счет отбросной теплоты газовых двигателей, пиковых потребностей — за счет отбросной теплоты котла-утилизатора, сжигание избытков газа в факелах ( $\sim 20\%$ ).

Расчеты показали, что по сравнению с другими вариантами В дает снижение затрат на энергию примерно на 10%, однако общие годовые затраты уменьшаются только до 85%. Дальнейшего снижения затрат можно было бы ожидать при подключении к коммунальным электросетям (параллельная эксплуатация) и подборе дополнительных потребителей теплоты. В случае эксплуата-

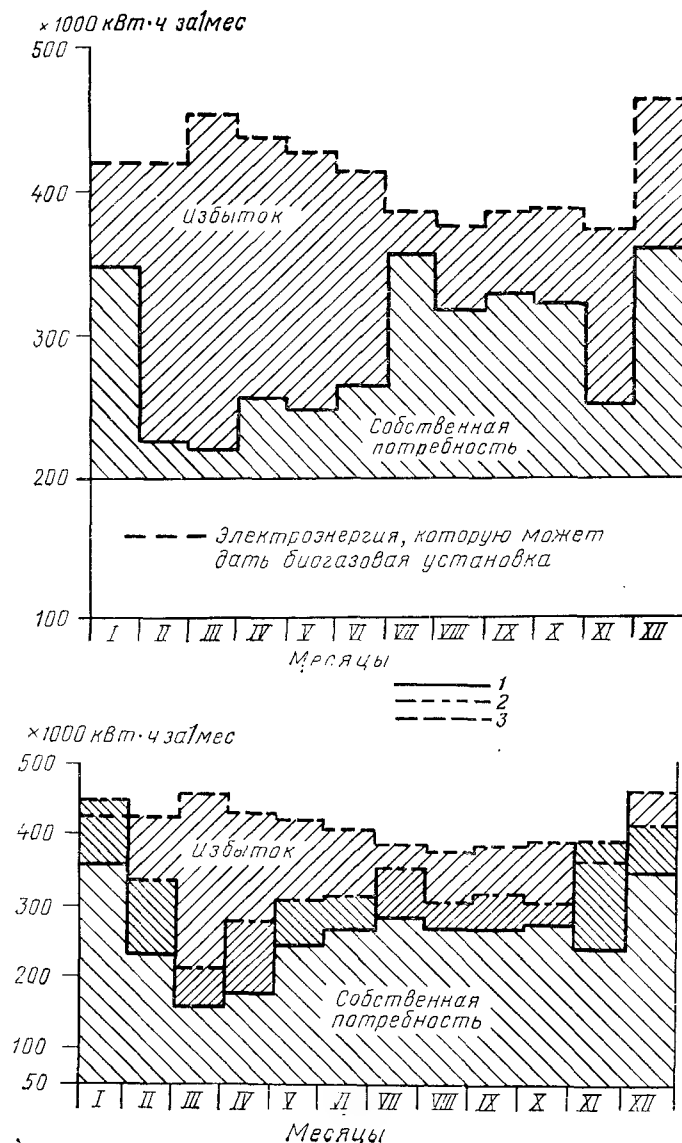


Рис. 29. Годовые диаграммы производства электрической (вверху) и тепловой (внизу) энергии с помощью установки по очистке городских стоков [3]:  
1 — собственная потребность в теплоте; 2 — выход теплоты при производстве электроэнергии; 3 — выход теплоты, соответствующий собственной потребности в электроэнергии.

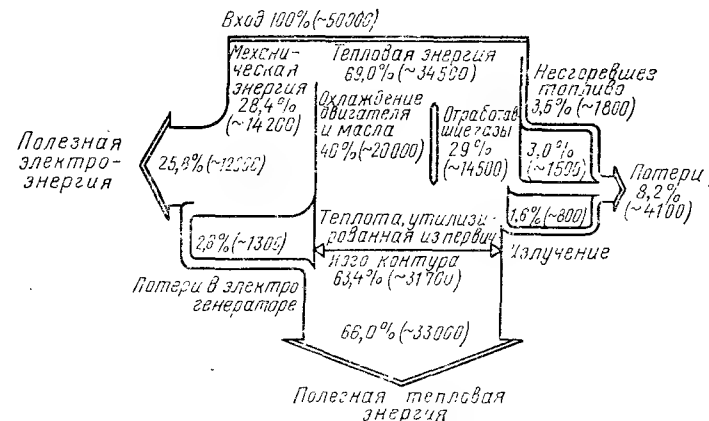


Рис. 30. Схема энергетического баланса компактной установки «Тотем» (Total energy module) автомобильной фирмы Фиат [138]. Цифры в скобках соответствуют тепловым эквивалентам энергии в ккал/ч.

ции небольших биогазовых установок не следует рассчитывать на снижение затрат в таких масштабах.

Фирма Фиат разработала на базе двигателя «Фиат-27» работающую на природном газе или биогазе компактную теплосиловую установку «Тотем» [138], которая вырабатывает электроэнергию (переменный ток напряжением 380 В, 15 кВт) и горячую воду (145 МДж/ч, или 35 тыс. ккал/ч). Часовая потребность ее в биогазе составляет около 10 м<sup>3</sup>, что соответствует затратам в 0,113 долл. Те же самые электроэнергия и теплота, полученные первая от энергоснабжающей организации, вторая — из системы с отопительным котлом, стоили бы 0,2 долл. Разница в этих цифрах и соответствует экономии энергии.

На рисунке 30 представлена схема энергетического баланса этой компактной установки, которая имеет хорошие шансы на использование в сельском хозяйстве.

## 8. Потребности сельскохозяйственных предприятий в энергии, которые могут быть покрыты с помощью биогаза

Следует различать потребности в биогазе для хозяйственно-бытовых нужд, получения продукции растение-

водства, получения продукции животноводства и для различных других видов сельскохозяйственного производства.

Наличие в хозяйстве собственного скота — не обязательная предпосылка использования биогаза, его можно получать и из соседнего хозяйства. Биогазовые установки, работающие только на растительных отходах (например, на соломе), представляются нерациональными. Из 1 кг соломы можно получить только 4,2 МДж энергии, причем не решается проблема удаления отходов. В то же время при непосредственном сжигании соломы энергии выделяется в три раза больше.

### 8.1. Крестьянские хозяйства ФРГ

В ФРГ имеется около 929 тыс. крестьянских хозяйств [147], насчитывающих около 3 258 300 взрослых работников и 928 тыс. детей до 14 лет. Средний состав семьи: трое-четверо взрослых (3,5) и один ребенок. В дальнейших расчетах рассмотрены четыре модельные хозяйства (табл. 17).

Таблица 17. Модельные хозяйства

|                               | Тип хозяйства |     |     |     |
|-------------------------------|---------------|-----|-----|-----|
|                               | А             | Б   | В   | Г   |
| Число взрослых                | 3             | 3   | 4   | 5   |
| Число детей                   | —             | 1   | 2   | 3   |
| Всего человек                 | 3             | 4   | 6   | 8   |
| Жилая площадь, м <sup>2</sup> | 190           | 120 | 150 | 200 |

Поскольку не имеется точных статистических данных об отапливаемой жилой площади, соответствующей этим моделям хозяйств, на основе опытных данных были определены соотношения между жилой площадью и ее оснащенностью отопительными приборами. Жилая площадь одного хозяйства была выбрана на 10% большей, чем в несельскохозяйственной зоне [137].

Для хозяйства с центральным снабжением горячей водой [106], обычным для сельских районов ФРГ, можно назвать следующие значения удельного расхода энергии при использовании природного газа: 5225 МДж в

год на взрослого человека (1248 Мкал в год) и 2670 МДж в год на ребенка (638 Мкал в год).

Эти данные позволяют определить потребность модельных хозяйств в энергии и биогазе для подогрева воды (табл. 18).

Таблица 18. Потребность в энергии и биогазе модельных хозяйств для подогрева воды

| Тип хозяйства | МДж год | МДж сут | Мкал сут | Биогаз             |                    |
|---------------|---------|---------|----------|--------------------|--------------------|
|               |         |         |          | м <sup>3</sup> год | м <sup>3</sup> сут |
| А             | 15 675  | 42,9    | (10,24)  | 712                | 1,9                |
| Б             | 18 345  | 50,3    | (12,00)  | 834                | 2,3                |
| В             | 26 240  | 71,9    | (17,15)  | 1 193              | 3,3                |
| Г             | 34 130  | 93,5    | (22,32)  | 1 555              | 4,3                |

Для децентрализованного горячего водоснабжения [106] можно принять потребность в энергии на 16...17 % меньше. Однако в сельском хозяйстве ФРГ этот вид водоснабжения не находит широкого распространения.

Для расчета отопления помещений была выбрана наименьшая температура наружного воздуха — 15°C и длительность отопительного сезона 220 дней [106].

В сельском хозяйстве ФРГ нет четкого разграничения построек по теплотехническим качествам. По закону «Об экономии энергии в постройках» от июля 1976 г. новые отапливаемые здания должны обладать совершенной тепловой защитой. Удельная потребность их в тепле не должна превышать 116 Вт/м<sup>2</sup> (100 ккал/(м<sup>2</sup>·ч)). Имеющиеся в сельских районах старые постройки обладают более высокой удельной потребностью в теплоте.

В таблице 19 приведены значения годовой потребности модельных хозяйств в тепловой энергии и биогазе для трех видов построек, различающихся по категориям теплоизоляции:

I категория: соответствует теплоизоляции, применяемой в новых зданиях согласно закону об экономии энергии — удельная потребность в теплоте 116 Вт/м<sup>2</sup> (100 ккал/(м<sup>2</sup>·ч));

II категория: обычная хорошая теплоизоляция — удельная потребность в теплоте 128 Вт/м<sup>2</sup> (110 ккал/(м<sup>2</sup>·ч));



Таблица 19. Годовая потребность модельных хозяйств в энергии и биогазе для отопления жилых домов (центральное водяное отопление с газовой топкой) с помощью обычного газового котла

| Категория теплоизоляции здания | Потребность хозяйства в энергии, МДж год |         |         |         |
|--------------------------------|------------------------------------------|---------|---------|---------|
|                                | А                                        | Б       | В       | Г       |
| I                              | 102 655                                  | 123 185 | 153 930 | 205 310 |
| II                             | 112 710                                  | 135 255 | 169 070 | 225 420 |
| III                            | 135 620                                  | 222 740 | 278 425 | 371 235 |

Продолжение

| Категория теплоизоляции здания | Потребность хозяйства в биогазе, м³ год |        |        |        |
|--------------------------------|-----------------------------------------|--------|--------|--------|
|                                | А                                       | Б      | В      | Г      |
| I                              | 4 666                                   | 5 600  | 6 700  | 9 332  |
| II                             | 5 123                                   | 6 148  | 7 685  | 10 247 |
| III                            | 8 437                                   | 10 150 | 12 656 | 16 874 |

Таблица 20. Суточная потребность в биогазе для отопления жилых домов в зависимости от месяца года (тип хозяйства Б, категория теплоизоляции II)

| Месяц    | Доля годовой потребности в энергии на отопление, % [15] | Потребность в биогазе, м³ |          |
|----------|---------------------------------------------------------|---------------------------|----------|
|          |                                                         | ежемесячная               | суточная |
| Январь   | 16,5                                                    | 1014                      | 33,0     |
| Февраль  | 15,0                                                    | 922                       | 33,0     |
| Март     | 12,5                                                    | 768                       | 25,0     |
| Апрель   | 8,0                                                     | 492                       | 16,5     |
| Май      | 5,0                                                     | 307                       | 10,0     |
| Июнь     | 1,8                                                     | 111                       | 3,5      |
| Июль     | 1,5                                                     | 92                        | 3,0      |
| Август   | 1,2                                                     | 74                        | 2,5      |
| Сентябрь | 4,0                                                     | 216                       | 8,0      |
| Октябрь  | 7,5                                                     | 462                       | 15,0     |
| Ноябрь   | 12,0                                                    | 738                       | 24,5     |
| Декабрь  | 15,0                                                    | 922                       | 30,0     |
| Всего    | 100,0                                                   | 6148                      | —        |

III категория: теплоизоляция, применяемая в старых постройках — удельная потребность в теплоте 191 Вт/м² (165 ккал/(м²·ч)).

Если использовать для отопления жилых домов газоконденсаторный тепловой насос вместо газового отопительного котла, то потребуется только около 42 % указанного количества газа (см. гл. 7).

Средняя потребность в биогазе может быть получена только путем процентного распределения годовой потребности в отоплении по отдельным месяцам [150]. В таблице 20 приведены эти значения для модельного хозяйства типа Б и категории теплоизоляции II.

Суточная потребность в энергии для приготовления пищи и кондитерских изделий при использовании кухонных плит, работающих на природном газе, исходя из осредненных, традиционных для ФРГ форм и обычаев (три раза в день — горячее блюдо, содержащее в среднем 12,5 МДж на чел. = 3000 ккал на 1 чел.), составляет 3,14 МДж на 1 чел. [106].

Соответствующие данные о потребности в биогазе для приготовления пищи отражены в таблице 21. Они со-

ответствуют примерно расходу электрической энергии на эти цели [133]. Коэффициент полезного действия газа и электрического тока при приготовлении пищи примерно одинаков.

Таблица 21. Потребность в энергии и биогазе для приготовления пищи

|                                         | Тип хозяйства |      |      |      |
|-----------------------------------------|---------------|------|------|------|
|                                         | А             | Б    | В    | Г    |
| Потребность в электроэнергии, кВт·ч/сут | 2,26          | 2,70 | 3,30 | 5,70 |
| Потребность в биогазе, МДж/сут          | 9,50          | 12,6 | 15,7 | 25,0 |
| Потребность в биогазе, м³/сут           | 0,5           | 0,6  | 0,7  | 1,2  |

Для работы домашних холодильников и морозильников на биогазе используются только холодильные установки абсорбционного типа, которые имеются в про-

Таблица 22. Потребность в энергии и биогазе холодильных и морозильных шкафов

|                                   | Тип хозяйства |     |     |     |
|-----------------------------------|---------------|-----|-----|-----|
|                                   | А             | Б   | В   | Г   |
| Вместимость холодильного шкафа, л | 150           | 200 | 250 | 300 |
| Вместимость морозильника, л       | 400           | 500 | 500 | 800 |
| Потребность в электроэнергии      |               |     |     |     |
| Холодильный шкаф, кВт·ч/сут       | 1,1           | 1,8 | 2,4 | 3,0 |
| Морозильник, кВт·ч/сут            | 2,7           | 3,2 | 3,2 | 4,2 |
| Итого                             | 3,8           | 5,0 | 5,6 | 7,2 |
| Потребность в биогазе, м³/сут     | 1,4           | 1,9 | 2,1 | 2,7 |

Таблица 23. Ориентировочные данные по расходу биогаза в домашнем хозяйстве (хозяйство типа Б, категория теплоизоляции II) в годовом разрезе, м³/сут

|                                              | Январь | Февраль | Март | Апрель | Май  | Июнь |
|----------------------------------------------|--------|---------|------|--------|------|------|
| Подогрев воды                                | 2,3    | 2,3     | 2,3  | 2,3    | 2,3  | 2,3  |
| Отопление жилых помещений                    | 33,0   | 33,0    | 25,0 | 16,5   | 10,0 | 3,5  |
| Приготовление пищи                           | 0,6    | 0,6     | 0,6  | 0,6    | 0,6  | 0,6  |
| Охлаждение и замораживание пищевых продуктов | 1,9    | 1,9     | 1,9  | 1,9    | 1,9  | 1,9  |
| Всего                                        | 37,8   | 37,8    | 29,8 | 21,3   | 14,8 | 8,3  |

Продолжение

|                                              | Июль | Август | Сентябрь | Октябрь | Ноябрь | Декабрь |
|----------------------------------------------|------|--------|----------|---------|--------|---------|
| Подогрев воды                                | 2,3  | 2,3    | 2,3      | 2,3     | 2,3    | 2,3     |
| Отопление жилых помещений                    | 3,0  | 2,5    | 8,0      | 15,0    | 24,5   | 30,0    |
| Приготовление пищи                           | 0,6  | 0,6    | 0,6      | 0,6     | 0,6    | 0,6     |
| Охлаждение и замораживание пищевых продуктов | 1,9  | 1,9    | 1,9      | 1,9     | 1,9    | 1,9     |
| Всего                                        | 7,8  | 7,3    | 12,8     | 19,8    | 29,3   | 34,8    |

даже. Обеспечение ими различных типов хозяйств весьма неодинаково. Данные о потребности этих холодильных установок в энергии и биогазе приведены в таблице 22. Имеющиеся в специальной литературе данные действительны для холодильных установок компрессорного типа. Расход энергии абсорбционными установками принимается большим на 10 %, что учтено при пересчете на биогаз.

В таблице 23 приведены обобщающие данные о возможной суточной потребности в биогазе в зависимости от месяца, а именно для хозяйства типа Б и категории теплоизоляции II. Этот тип хозяйства положен также в основу рассматриваемых в главе 8 модельных производств.

## 8.2. Растениеводство

В растениеводстве полностью или частично с помощью биогаза можно обеспечить энергией следующие производственные процессы: сушка зеленых кормов горячим воздухом, сушка сена под навесом, сушка зерна, сельскохозяйственное винокурение, выращивание продукции в теплицах.

Потребность в энергии при сушке зеленых кормов горячим воздухом зависит от требуемой степени обезвоживания, чтобы при весьма различной влажности скашиваемой массы получить конечную влажность, необходимую для хранения корма. В 1972 г. в ФРГ имелось 83 сушилки, работающих на горячем воздухе, со средней производительностью по удалению влаги 4,48 т/ч [141].

Для ориентировочного расчета потребности в энергии и возможного покрытия ее с помощью биогаза служат средние значения, приведенные в таблице 24.

Сезон продолжается около трех месяцев, причем средняя нагрузка малых установок составляет около 1000 ч, больших — около 2400 ч.

Широко распространена сушка сена под навесом способом активного вентилирования, а также с небольшим подогревом воздуха (3...4°C) с помощью теплогенератора, работающего на жидком топливе или газе. Затратив 1 кДж тепловой энергии, можно нагреть 1 м³ воздуха примерно на 1°C. Но в большей мере используются сушилки с более значительным подогревом воз-

Таблица 24. Показатели производительности и потребность в энергии работающих на горячем воздухе сушилок для зеленых кормов\*

| Производительность по удалению влаги, т/ч | Производительность по влажной массе (80% влажности), т/ч | Производительность* по сухому продукту (14% влажности), т/ч | Потребность в жидком топливе, л/ч | Потребность в биогазе |                                             |              |
|-------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------|---------------------------------------------|--------------|
|                                           |                                                          |                                                             |                                   | м³/ч                  | при продолжительности сушки в течение суток |              |
|                                           |                                                          |                                                             |                                   |                       | 10 ч, м³/сут                                | 24 ч, м³/сут |
| 2,7                                       | 2,37                                                     | 0,72                                                        | 259                               | 405                   | 4 050                                       | 9 750        |
| 10                                        | 8,81                                                     | 2,67                                                        | 801                               | 1 250                 | 12 500                                      | 30 000       |
| 35                                        | 30,78                                                    | 9,33                                                        | 2 426                             | 3 790                 | 37 900                                      | 91 000       |

\* При сьеме влаги 330 кг на 100 кг сухого продукта и фактической производительности установки около 89 % от номинальной.

духа (до 20°C), которые за сутки высушивают траву до кондиций, необходимых для хранения. Важнейшие данные о потребности в энергии и биогазе для этих сушилок показаны в таблице 25. Биогаз применяется только для подогрева воздуха, но его можно также использовать в газовом двигателе для привода вентилятора и одновременно утилизировать отбросное тепло двигателя для подогрева воздуха (см. табл. 14) примерно на 4°.

Таблица 25. Потребности в энергии и возможности ее покрытия биогазом для сушки сена под навесом горячим воздухом (начальная влажность 30...40%)

| Производительность по исходной массе, т в неделю | Подача воздуха вентилятором для средней климатической зоны* Под давлением 40 Па, м³/ч | Мощность, необходимая для привода вентилятора, кВт | Средняя тепловая мощность при подогреве воздуха на 4°C-кВт | Потребность в биогазе                                        |                                                            |
|--------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
|                                                  |                                                                                       |                                                    |                                                            | только для подогрева воздуха в течение 10 ч за сутки, м³/сут | для привода вентилятора с помощью газового двигателя, м³/ч |
| 4                                                | 14 400                                                                                | 2,5                                                | 16,7                                                       | 27,5                                                         | —                                                          |
| 6                                                | 21 600                                                                                | 4,5                                                | 25,0                                                       | 41,0                                                         | —                                                          |
| 8                                                | 28 800                                                                                | 5,5                                                | 33,3                                                       | 55,0                                                         | (3,6)                                                      |
| 10                                               | 36 000                                                                                | 7,0                                                | 41,7                                                       | 68,5                                                         | (4,6)                                                      |
| 12                                               | 43 200                                                                                | 10,0                                               | 50,0                                                       | 82,0                                                         | 6,5                                                        |

\* Для средней климатической зоны предполагается загрузка 100 ч в неделю при влажности воздуха ≤70 %. Колебания загрузки 80...125 ч в неделю допускают отклонения подачи вентилятора в пределах ±20 %.

Таблица 26. Потребность в энергии для сушки сена под навесом при различной степени подогрева воздуха и различной массе обрабатываемой за один цикл партии материала

|                                                 | Первоначальная влажность, % |          |           |           |
|-------------------------------------------------|-----------------------------|----------|-----------|-----------|
|                                                 | 30...40                     | 40...50  | 50...60   | >60       |
| Подогрев воздуха, °C                            | До 10                       | 10...20  | 20...30   | 30...40   |
| Продолжительность сушки одной партии, ч         | 100...200                   | 50...100 | 20        | 10...20   |
| Потребность в жидком топливе, л на 1 т сена     | 30...50                     | 70...90  | 130...160 | 220...270 |
| Потребность в электроэнергии, кВт·ч на 1 т сена | 70...80                     | 80...90  | 90...100  | 100...120 |

Потребность в биогазе только для подогрева воздуха

|                              |     |       |       |       |
|------------------------------|-----|-------|-------|-------|
| При массе одной партии 4 т:  |     |       |       |       |
| м³ на 1 партию               | 250 | 500   | 930   | 1 560 |
| м³/сут                       | 30  | 125   | 900   | 1 560 |
| м³/ч                         | 1,7 | 6,7   | 45    | 75    |
| При массе одной партии 8 т:  |     |       |       |       |
| м³ на 1 партию               | 500 | 1 000 | 1 860 | 3 120 |
| м³/сут                       | 60  | 250   | 1 800 | 3 120 |
| При массе одной партии 12 т: |     |       |       |       |
| м³ на 1 партию               | 750 | 1 500 | 2 790 | 4 680 |
| м³/сут                       | 90  | 375   | 2 700 | 4 680 |

Данные по установкам для сушки сена под навесом, которые работают с более значительным подогревом воздуха, приведены в таблице 26.

В крестьянских хозяйствах ФРГ для подогрева воздуха используют обычно котельное топливо или сжиженный газ. Простая сушка вентилярованием с подогревом воздуха на 4°C еще не нашла широкого применения. Для расчета можно воспользоваться приведенными выше данными по сушке сена вентилярованием. Все больше внедряется сушка горячим воздухом в установках порционного и непрерывного действия. Соответствующие данные о расходе энергии и возможном использовании биогаза можно взять из таблицы 27. Разницей в потребностях в энергии для сушилок порционного и непрерывного действия при этом ориентировочном расчете можно пренебречь. Хорошие сушилки требуют на уда-

Таблица 27. Потребность в энергии и возможность покрытия ее биогазом при сушке зерновых и кукурузы

| Номинальная производительность по сухому продукту, т ч | Съем влаги, кг Н <sub>2</sub> О са 1 ч | Средняя тепловая мощность, кВт | Потребность в биогазе |                                             |                         |
|--------------------------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------|-----------------------|---------------------------------------------|-------------------------|
|                                                        |                                        |                                | м <sup>3</sup> /ч     | при продолжительности сушки в течение суток |                         |
|                                                        |                                        |                                |                       | 1) ч м <sup>3</sup> , сут                   | 20 ч м <sup>3</sup> сут |
| Зерно (~ 4 %-ный сьем влаги)                           |                                        |                                |                       |                                             |                         |
| 0,5                                                    | 24                                     | 34,7                           | 5,5                   | 55                                          | 110                     |
| 1,0                                                    | 49                                     | 68,0                           | 11,0                  | 110                                         | 220                     |
| 2,0                                                    | 98                                     | 136,1                          | 22,5                  | 225                                         | 450                     |
| 3,0                                                    | 146                                    | 202,8                          | 33,0                  | 330                                         | 660                     |
| Кукуруза (~ 25 %-ный сьем влаги)                       |                                        |                                |                       |                                             |                         |
| 0,5                                                    | 200                                    | 277,8                          | 46                    | 460                                         | 920                     |
| 1,0                                                    | 400                                    | 555,5                          | 91                    | 910                                         | 1 820                   |
| 2,0                                                    | 800                                    | 1 111,1                        | 182                   | 1 820                                       | 3 640                   |

ление 1 кг воды удельного расхода теплоты около 5 МДж (для кукурузы — только 4,6 МДж), что соответствует тепловой мощности 68,0 кВт для сушилки номинальной производительностью 1 т/ч.

Сезон сушки для зерновых и кукурузы 3...4 недели.

Средняя производительность сельскохозяйственных винокуренных заводов составляет 560 гл этилового спирта в год. По данным Института технологии брожения (Берлин), для производства 1 гл этилового спирта требуется 2500 МДж энергии (70 л котельного топлива на 1 гл). Теоретически допустимо в наиболее совершенных установках снижение потребности в энергии до 1450 МДж/гл (40 л котельного топлива на 1 гл). Поскольку сезон винокурения в ряде случаев продолжается очень долго, этот вид применения биогаза представляется благоприятным с точки зрения равномерности его расходования. Данные о потребностях винокуренных заводов в энергии и возможностях их покрытия биогазом приведены в таблице 28.

Большие потребности в теплоте имеют теплицы. Для их отопления наряду с жидким топливом в широких масштабах используется также природный газ. В настоящее время проводятся эксперименты с биогазовым отоплением, направленные на снижение стоимости энер-

Таблица 28. Потребности винокуренных заводов в энергии и возможности их покрытия биогазом

| Удельная потребность установки в энергии, МДж/гл      | Производительность, гл год | Общая потребность в тепловой энергии за сезон, МДж | Потребность в биогазе (м³ сут) при продолжительности сезона в месяцах |     |     |
|-------------------------------------------------------|----------------------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-----|-----|
|                                                       |                            |                                                    | 4                                                                     | 6   | 8   |
| 2 500 (соответствует 70 л котельного топлива на 1 гл) | 100                        | 250 000                                            | 90                                                                    | 60  | 45  |
|                                                       | 300                        | 750 000                                            | 270                                                                   | 180 | 135 |
|                                                       | 500                        | 1 250 000                                          | 450                                                                   | 300 | 225 |
|                                                       | 700                        | 1 750 000                                          | 630                                                                   | 420 | 315 |
| 1 450 (40 л котельного топлива на 1 гл)               | 100                        | 145 000                                            | 52                                                                    | 35  | 26  |
|                                                       | 300                        | 435 000                                            | 156                                                                   | 105 | 78  |
|                                                       | 500                        | 725 000                                            | 260                                                                   | 175 | 130 |
|                                                       | 700                        | 1 015 000                                          | 364                                                                   | 245 | 182 |

гии путем использования отопительных установок нового типа с конденсацией отбросных газов. В зависимости от вида выращиваемых в теплицах культур значительно изменяется удельная потребность в теплоте. В таблице 29 приведены средние данные о количестве тепловой энергии [107] и возможностях покрытия ее биогазом. В принципе тепличное садоводство нуждается в очень большом количестве энергии в расчете на одно хозяйство. В среднем годовая потребность в жидком топливе составляет около 100 л на 1 м² площади защищенного грунта.

Чтобы определить возможную суточную потребность в биогазе, необходимо, как и в случае отопления жилых помещений, исходить из процентного распределения годовой потребности в энергии по месяцам. В садоводстве обычно принято вести расчет даже по половинам ме-

Таблица 29. Потребности тепличного хозяйства в энергии и возможности их покрытия биогазом

| Расчетная тепловая кВт | мощность установки, Мкал ч | Обогреваемая площадь защищенного грунта, м² | Потребность в жидком топливе, л год | Потребность в биогазе, м³ год |
|------------------------|----------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|
| 116,7                  | 100                        | 1 200                                       | 120 000                             | 186 000                       |
| 1 166,7                | 1 000                      | 12 000                                      | 1 200 000                           | 1 860 000                     |
| 2 333,3                | 2 000                      | 24 000                                      | 2 400 000                           | 3 720 000                     |

Таблица 30. Процентное распределение тепловой энергии для тепличных хозяйств [132]

|          | Распределение тепловой энергии, % |                     | Суточная потребность в биогазе для площади защищенного грунта 1200 м <sup>2</sup> (табл. 29), м <sup>3</sup> |                     |
|----------|-----------------------------------|---------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
|          | 1-я половина месяца               | 2-я половина месяца | 1-я половина месяца                                                                                          | 2-я половина месяца |
| Январь   | 9,8                               | 10,6                | 1 220                                                                                                        | 1 230               |
| Февраль  | 9,1                               | 7,3                 | 1 210                                                                                                        | 975                 |
| Март     | 6,5                               | 5,0                 | 755                                                                                                          | 620                 |
| Апрель   | 3,5                               | 2,6                 | 435                                                                                                          | 320                 |
| Май      | 1,8                               | 1,4                 | 210                                                                                                          | 170                 |
| Июнь     | 0,7                               | 0,3                 | 87                                                                                                           | 37                  |
| Июль     | 0,2                               | 0,2                 | 24                                                                                                           | 21                  |
| Август   | 0,2                               | 0,5                 | 24                                                                                                           | 62                  |
| Сентябрь | 0,8                               | 1,6                 | 100                                                                                                          | 200                 |
| Октябрь  | 2,9                               | 4,0                 | 360                                                                                                          | 465                 |
| Ноябрь   | 5,4                               | 7,2                 | 665                                                                                                          | 895                 |
| Декабрь  | 8,4                               | 10,0                | 1 050                                                                                                        | 1 160               |

сяца [132]. Соответствующее распределение годовой потребности в энергии (табл. 29) приводится в таблице 30.

### 8.3. Животноводство

В животноводстве также можно использовать биогаз для покрытия потребностей в энергии отдельных процессов, в которых сегодня в основном применяют электроэнергию. В Научно-исследовательском институте механизации сельского хозяйства в Вейенштефане [40] были проведены подробные исследования потребности в энергии для содержания животных; результаты этой работы использованы в приведенных ниже таблицах.

Промывочные автоматы для доильных установок могут работать на нагревателях проточного типа, использующих биогаз в качестве источника энергии (табл. 31).

Энергия для охлаждения молока требуется в течение всего года. Применение биогаза для этой цели возможно лишь в абсорбционных холодильных установках, правда специально для молочных охладителей такие агрегаты не выпускаются. Ориентировочный расход газа

Таблица 31. Потребности промывочных автоматов для доильных установок в энергии и возможности покрытия их биогазом [40]

|                               | Поголовье животных, усл. гол. | Присоединительная электрическая мощность установок, кВт | Расход энергии |                            | Возможная потребность в биогазе, м <sup>3</sup> на 1 усл. гол. в сутки |
|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------------------------|----------------|----------------------------|------------------------------------------------------------------------|
|                               |                               |                                                         | МДж/год        | МДж на 1 усл. гол. в сутки |                                                                        |
| Привязное содержание скота    | 20                            | 7,5                                                     | 8 817          | 1,20                       | 0,06                                                                   |
|                               | 40                            | 9,0                                                     | 11 222         | 0,80                       | 0,04                                                                   |
| Беспривязное содержание скота | 40                            | 6,0                                                     | 6 412          | 0,43                       | 0,02                                                                   |
|                               | 60                            | 7,5                                                     | 8 817          | 0,40                       | 0,02                                                                   |
|                               | 80                            | 9,0                                                     | 10 420         | 0,36                       | 0,02                                                                   |

в установках этого класса мощности примерно на 50% выше, чем в компрессорных холодильных устройствах. При ежесуточной вывозке молока и среднем удое 5000 л на корову в год, удельном расходе энергии 7 МДж на 100 л охлаждаемого молока и 75%-ной загрузке охладителей потребности в энергии на охлаждение и возможности покрытия их биогазом выражаются цифрами, приведенными в таблице 32. При вывозке молока один раз в двое суток потребность в энергии будет примерно на 15% выше.

Таблица 32. Потребности в энергии на охлаждение молока и возможности покрытия их биогазом

| Поголовье скота, усл. гол. | Присоединительная электрическая мощность установок, кВт | Расход энергии |                            | Возможная потребность в биогазе       |                    |
|----------------------------|---------------------------------------------------------|----------------|----------------------------|---------------------------------------|--------------------|
|                            |                                                         | МДж год        | МДж на 1 усл. гол. в сутки | м <sup>3</sup> на 1 усл. гол. в сутки | м <sup>3</sup> сут |
| 20                         | 1,2                                                     | 7 000          | 0,96                       | 0,07                                  | 1,4                |
| 40                         | 2,4                                                     | 14 000         | 0,96                       | 0,07                                  | 2,8                |
| 60                         | 3,6                                                     | 21 000         | 0,96                       | 0,07                                  | 4,2                |
| 80                         | 4,8                                                     | 28 000         | 0,96                       | 0,07                                  | 5,6                |

Для содержания дойных коров и свиней постоянно требуется горячая вода. Данные о потребности в энергии и возможностях покрытия ее биогазом при эксплуатации бойлеров с подогревом воды от 10 до 60°C в зависимости от размеров поголовья скота приведены в таблице 33 [40].

Таблица 33. Потребности в энергии и возможности покрытия их биогазом при подогреве воды в бойлерах

|                         | Число животных, усл. гол. | Вместимость бойлера, л | Необходимая потребность в энергии, МДж на 1 усл. гол. в год | Возможная потребность в биогазе |                           |
|-------------------------|---------------------------|------------------------|-------------------------------------------------------------|---------------------------------|---------------------------|
|                         |                           |                        |                                                             | м³ на 1 усл. гол. в год         | м³ на 1 усл. гол. в сутки |
| Дойные коровы           |                           |                        |                                                             |                                 |                           |
| Привязное содержание    | 20                        | 120                    | 566                                                         | 30                              | 0,08                      |
|                         | 40                        | 200                    | 407                                                         | 21                              | 0,06                      |
| Беспривязное содержание | 40                        | 300                    | 593                                                         | 31                              | 0,09                      |
|                         | 60                        | 500                    | 558                                                         | 29                              | 0,08                      |
|                         | 80                        | 600                    | 533                                                         | 28                              | 0,08                      |
| Откармливаемые свиньи   | 300 (36)                  | 120                    | 78                                                          | 4,1                             | 0,011                     |
|                         | 600 (72)                  | 200                    | 42                                                          | 2,2                             | 0,006                     |
|                         | 1000 (120)                | 300                    | 27                                                          | 1,4                             | 0,004                     |
| Племенные свиньи        | 100 (46)                  | 300                    | 94                                                          | 4,9                             | 0,013                     |

Отопление необходимо только в свинарниках-маточниках [40]. Общая потребность в теплоте при этом относительно невелика. Для свиноматок средней массой 200 кг при наружной температуре до  $-10^{\circ}\text{C}$  и продолжительности отопительного периода 60 сут удельная потребность в теплоте составляет 1950 МДж на 1 усл. гол. в год, а соответствующая потребность в биогазе — около  $1,8 \text{ м}^3$  на 1 усл. гол. в сутки. В более холодных климатических зонах потребность в биогазе возрастает вдвое.

Например, в помещениях для первого периода откорма

|                                                                                    |      |      |      |
|------------------------------------------------------------------------------------|------|------|------|
| при массе животных, кг . . .                                                       | 10   | 20   | 30   |
| потребность в теплоте, МДж на 1 усл. гол. в год . . .                              | 2800 | 1500 | 1300 |
| соответствующая потребность в биогазе, $\text{м}^3$ на 1 усл. гол. в год . . . . . | 147  | 80   | 68   |
| $\text{м}^3$ на 1 усл. гол. в сутки . .                                            | 2,5  | 1,3  | 1,1  |

Доильные установки следует также по возможности отапливать тем или иным способом (отопительный период — около 150 суток). И в этом случае можно использовать биогаз. Потребности в энергии и возможности покрытия их биогазом приведены в таблице 34.

Таблица 34. Потребности в энергии и возможности покрытия их биогазом при отоплении доильных установок

|                                             | Число дойных коров |       |        |
|---------------------------------------------|--------------------|-------|--------|
|                                             | 40                 | 60    | 80     |
| Зона со средними климатическими условиями   |                    |       |        |
| Потребность в энергии, МДж/год              | 3 600              | 4 680 | 5 760  |
| Возможная потребность в биогазе:            |                    |       |        |
| $\text{м}^3/\text{год}$                     | 164                | 212   | 262    |
| $\text{м}^3$ на 1 сут отопительного периода | 1,1                | 1,4   | 1,7    |
| Зона с суровыми климатическими условиями    |                    |       |        |
| Потребность в энергии, МДж/год              | 7 200              | 9 000 | 10 800 |
| Возможная потребность в биогазе:            |                    |       |        |
| $\text{м}^3/\text{год}$                     | 327                | 410   | 490    |
| $\text{м}^3$ на 1 сут отопительного периода | 2,2                | 2,7   | 3,3    |

Биогаз можно применять даже для отопления птичников в течение зимнего периода. При наружной температуре до  $-10^{\circ}\text{C}$ , внутренней температуре  $18^{\circ}\text{C}$  для молодок и кур-несушек (средней массой  $1,13 \text{ кг}$ ) и  $26^{\circ}\text{C}$  для цыплят (средней массой  $0,16 \text{ кг}$ ), подаче отсасывающего вентилятора  $0,49$  и приточного —  $0,44 \text{ м}^3/\text{ч}$  на 1 голову (молодки и несушки) требуется [73]:

| теплоты в приточном воздухе       | соответствующее количество биогаза                                                    |
|-----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| $26,8 \text{ кДж/ч}$ на 1 несушку | $1,2 \text{ м}^3/\text{ч}$ на 1 000 гол. ( $29 \text{ м}^3/\text{сут}$ на 1 000 гол.) |
| $6,2 \text{ кДж/ч}$ на 1 цыпленок | $0,3 \text{ м}^3/\text{ч}$ на 1 000 гол. ( $7 \text{ м}^3/\text{сут}$ на 1 000 гол.)  |

#### 8.4. Модельные хозяйства

Используя вышеупомянутые отдельные значения возможного расхода биогаза для различных целей, можно получить суммарные показатели использования биогаза для модельных хозяйств. Ниже такие расчеты проделаны для трех типов модельных хозяйств и представлены графиками в годовом разрезе (рис. 31...33). Наиболее важные данные приведены в таблице 35. Представляется интересным сравнение ожидаемого производства

Таблица 35. Характеристика трех типов модельных хозяйств и возможности применения в них биогаза (см. рис. 31, 33)

|                                             | Модельное хозяйство              |                            |                |
|---------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------|----------------|
|                                             | I тип                            | II тип                     | III тип        |
| Направление                                 | Кормопроизводство                | Луго-пастбищное            | Зерновое       |
| Местонахождение                             | Средневысокие горы               | Альгей                     | Вестфалия      |
| Число членов семьи                          | 4                                | 4                          | 4              |
| Площадь с.-х. угодий, га в том числе        | 15                               | 40                         | 40             |
| площадь лугов и пастбищ, га,                | 10                               | 40                         | —              |
| из них сенокосов, га                        | 5                                | 20                         | —              |
| площадь под зерновыми, га                   | 5                                | —                          | 40             |
| Число животных в том числе                  | 15                               | 76                         | 36             |
| дойных коров (стойловое содержание)         | 10                               | 60                         | —              |
| молодняка, усл. гол.                        | 5                                | 16                         | —              |
| откармливаемых свиней                       | —                                | —                          | 300            |
| Сушка сена                                  | Горячим воз-духом (см. табл. 24) | Под навесом (см. табл. 26) | —              |
| подогрев воздуха, °С                        | 4                                | 30                         | —              |
| емкость установ-ки, т                       | 8                                | 4                          | —              |
| продолжительность сушки одной партии        | 1 неделя (см. табл. 27)          | 1 сутки                    | —              |
| Сушка зерна                                 | —                                | —                          | (см. табл. 27) |
| производительность ус-тановки, т/ч          | 0,5                              | —                          | 1,0            |
| продолжительность сушки в течение су-ток, ч | 10                               | —                          | 10             |
| Расход биогаза                              | —                                | —                          | —              |
| Сушка сена, м³/сут                          | 55                               | 900                        | —              |
| дней                                        | 36                               | 50                         | —              |
| календарное время                           | 15.05—30.09                      | 25.05—30.09                | —              |
| Сушка зерна, м³/сут                         | 55                               | —                          | 110            |
| дней                                        | 5                                | —                          | 20             |
| календарное время                           | 15.07—1.09                       | —                          | 10.07—4.09     |
| Оборудование животно-водческих помещений:   | —                                | —                          | —              |
| промылочные автома-ты (см. табл. 31),       | —                                | 1,2                        | —              |

Продолжения

|                                                                      | Модельное хозяйство                              |     |     |
|----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-----|-----|
|                                                                      | I                                                | II  | III |
| охлаждители мо-лока (см. табл. 32), м³/сут                           | 1,1                                              | 4,2 | —   |
| бойлеры (см. табл. 33) м³/сут                                        | 1,2                                              | 5,4 | 0,4 |
| отопительные устрой-ства для доильных станков (см. табл. 34), м³/сут | —                                                | 2,7 | —   |
| Домашнее хозяйство (см. табл. 23), м³/сут                            | 7,3...37,8 с колебаниями в зависимости от месяца |     |     |
| Количество биогаза при его выходе:                                   | —                                                | —   | —   |
| 0,2 м³ с 1 кг сухого органического веще-ства, м³/сут                 | 15                                               | 76  | 27  |
| 0,4 м³ с 1 кг сухого органического веще-ства, м³/сут                 | 30                                               | 152 | 54  |

биогаза и возможности его применения в конкретном хозяйстве. Наличие неиспользованного газа вызывает рост удельных затрат. При этом, с одной стороны, получают большие неиспользованные излишки, а с другой — количество получаемого газа недостаточно для такого энергетического процесса, как сушка, несмотря на применение соответствующих сушилок меньшей производительности.

Одна из основных трудностей, связанных с вопроса-ми рентабельного применения биогаза в среднем сель-скохозяйственном предприятии, состоит, очевидно, в та-ком несбалансированном балансе между выходом газа и возможным его использованием; долговременное хране-ние его в газгольдерах отпадает по финансовым сооб-ражениям (см. табл. 10, а также главу 5). В этом направлении следует предпринять серьезные исследова-ния. Возможными вариантами представляются, напри-мер, модернизированные способы сушки или двухсту-пенчатый нагрев воздуха. Соседние предприятия, в том числе и несельскохозяйственные, лишь тогда согласятся использовать излишки энергии, получаемые с помощью

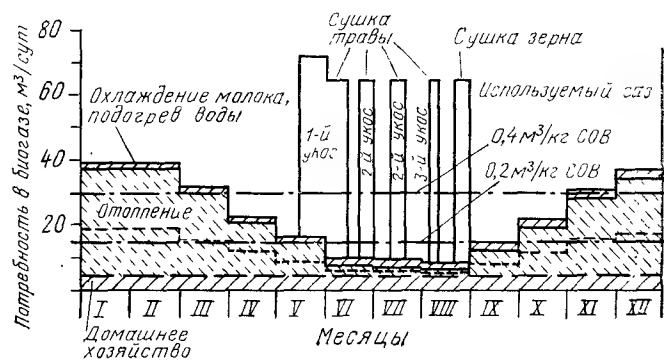


Рис. 31. Модельное хозяйство I типа (см. табл. 35): в части диаграммы, соответствующей отоплению, верхняя линия относится к применению обычного газового котла, средняя (штриховая) — применению газокompрессионного теплового насоса. COB — сухое органическое вещество.

биогаза, когда стоимость единицы такой энергии будет ниже или, по крайней мере, равна удельной стоимости традиционных видов энергии, а также в том случае, когда будет гарантировано непрерывное ее поступление. Для этой цели необходимо собрать еще значительное количество опытных данных. Для специализированных предприятий, например убойных пунктов для птицы, винокурен, этой проблемы не существует.

## 9. Использование биошлама

Все эксплуатируемые в настоящее время биогазовые установки работают на жидком субстрате. Поэтому биошлам тоже жидкий и транспортируется, как и обычный жидкий навоз, насосами и автоцистернами. Как и жидкий навоз, шлам используют в качестве органического удобрения на полях и пастбищах сельскохозяйственного предприятия или соседнего хозяйства. В некоторых случаях биошлам разделяют на жидкую и твердую фазы и утилизируют их в отдельности (например, твердую часть, чтобы получить готовый для продажи продукт, гранулируют и сушат).

Биогазовый метод не следует рассматривать как решение проблемы отходов. Уменьшение массы исход-

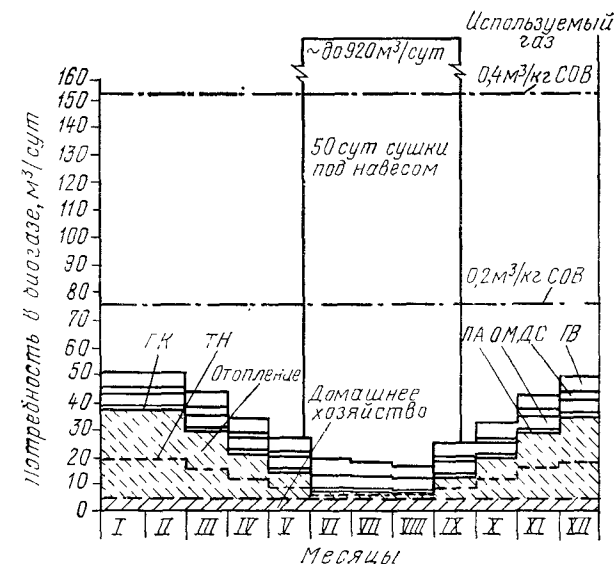


Рис. 32. Модельное хозяйство II типа (см. табл. 35): ГК — газовый котел; ТН — тепловой насос с газокompрессионным приводом; ГВ — получение горячей воды; ДС — отопление доильных станков; ОМ — охлаждение молока; ПА — промывочный автомат.

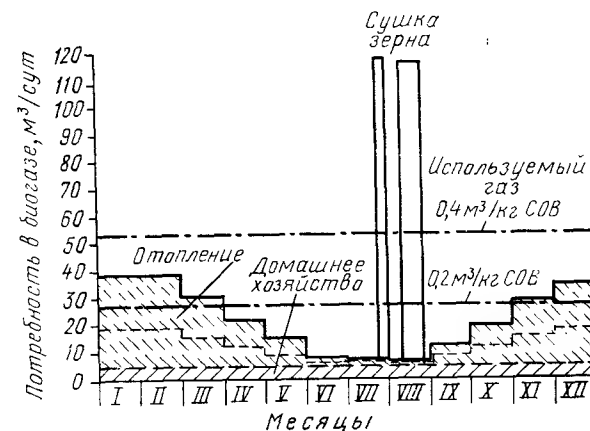


Рис. 33. Модельное хозяйство III типа (см. табл. 35).



ного субстрата столь незначительно, что им практически можно пренебречь. Во время процесса брожения разлагается в среднем около 30% органического вещества, что составляет всего 10% от массы жидкого навоза. Таким образом, общая масса исходного субстрата уменьшается только на 3%.

С наступлением энергетического кризиса дорожают минеральные удобрения, производство которых чрезвычайно энергоемко. Это послужило причиной того, что получаемые в самом хозяйстве органические удобрения вновь обрели свою прежнюю ценность и усилилось стремление использовать их оптимальным способом. В последнем случае речь идет прежде всего об исключении потерь питательных веществ и тенденции к увеличению складских емкостей, что позволило бы вносить удобрения в наиболее благоприятные календарные сроки. Это относится как к обычному жидкому навозу, так и в еще большей мере к биошлему.

Ценность шлама как удобрения зависит от его химического состава. Во время процесса брожения уменьшается только содержание углерода и, следовательно, соотношение C/N. Фосфор и калий, как и азот, полностью сохраняются в биошлеме; в биогазе могут содержаться только их следы. Однако при последующем длительном хранении в открытых емкостях вновь возникают потери азота в виде аммиака. Часто утверждают, что биошлам обладает значительно лучшим удобрительным действием, чем обычный навоз. Точные и репрезентативные сравнительные исследования шлама с обычным жидким навозом или с жидким навозом, подвергнутым аэробной обработке из соображений охраны окружающей среды (только в таком случае можно с полным правом сравнивать биошлам с этим продуктом), которые могли бы подтвердить упомянутое выше мнение, пока не проведены. Сравнение с твердым навозом (высокие потери питательных веществ) неправомерно. Причиной лучшего удобрительного действия шлама может служить меньшая величина соотношения C/N и то, что в нем сохраняется весь азот. Весьма возможно также, что во время процесса брожения фосфор переходит в форму, лучше усваиваемую растениями, и что образуются небольшие количества действующих веществ, которые благоприятно влияют на рост растений. Абеле [1] показал, что путем аэрации жидкого навоза, а также

добавлением бентонита и определенных компостобразующих препаратов использование азота навоза удается повысить на 10...25%. Исходя из этого, можно предположить, что удобряющее действие биошлама на 15% выше удобряющего действия необработанного жидкого навоза. Однако лишь точные исследования могут подтвердить эти выводы.

По Хойеру [42], стоимость необработанного жидкого навоза в предположении, что гарантируется его 30%-ное использование растением, составляет:

- навоз крупного рогатого скота — 7,20 марки ФРГ за 1 м<sup>3</sup>;
- навоз свиней — 8,55;
- куриный помет — 16,80 марки ФРГ за 1 м<sup>3</sup>.

Увеличение удобряющего действия на 15% повышает стоимость навоза соответственно на 1,08; 1,28 и 2,52 марки ФРГ за 1 м<sup>3</sup>.

Интенсивность запаха зависит от степени сбраживания, а последняя, в свою очередь, связана с размерами реактора и стоимостью установки. Объективного критерия возможного ослабления интенсивности запаха до сих пор не существует, его еще нужно разработать. Лишь субъективно указывается на существенное ослабление запахов при биогазовом методе по сравнению с запахом необработанного жидкого навоза, поэтому биогазовый метод при высокой степени разложения исходного субстрата может быть признан с точки зрения охраны окружающей среды равноценным различным аэробным способам обработки. Степень обеззараживания биошлама зависит от выбранного варианта биогазового метода и срока последующего хранения шлама. Надежного обеззараживания не гарантирует ни один из вариантов анаэробного сбраживания.

Еще не ясно, какова кормовая ценность обнаруженного в биомассе шлама белка или с каким эффектом можно использовать биошлам как питательную среду для выращивания водорослей, дрожжей и грибов.

## 10. Экономичность сельских биогазовых установок

Экономичность биогазовой установки следует оценивать с разных позиций в зависимости от того, какая основная цель преследуется при ее эксплуатации. И наоборот, техническое оснащение установки должно соответство-

вать целевому направлению ее использования, причем от последнего фактора будут зависеть и соответствующие расходы.

Можно назвать три основные цели применения биогазовых установок.

1. Производство биогаза в качестве источника энергии. Биошлам в этом процессе играет роль побочного продукта.
2. Получение высокоэффективного «биоудобрения» и сохранение содержащихся в отходах сельскохозяйственного производства питательных веществ. Биогаз рассматривается как побочный продукт.
3. Решение задачи охраны окружающей среды, т. е. уменьшение или предотвращение загрязнения окружающей среды отбросными продуктами сельскохозяйственного производства.

На практике в той или иной мере учитываются все эти аспекты. При подсчете же экономичности необходимо принимать во внимание все три аспекта, равно как и вопрос о том, дает ли сооружение установки основание для получения в какой-либо форме государственной субсидии на строительство, например в качестве поощрения за применение новейших технических достижений или за экономию энергии, в частности за экономию первичных энергоносителей (котельного топлива и электричества). Расходы на техническое оснащение установки при осуществлении варианта 2 могут быть, по-видимому, меньше, а для варианта 3 больше, чем для варианта 1.

Ход расчета сам по себе ясен. Проблема состоит лишь в том, чтобы определить реальные характеристики будущей установки, в особенности следующие:

- срок службы;
- ремонтные издержки;
- расходы на техническое обслуживание;
- собственные потребности в энергии;
- трудоемкость эксплуатации и соответствующие расходы на оплату труда;
- оценка аспекта охраны окружающей среды;
- возможная экономия минеральных удобрений;
- реальный выход утилизируемого газа, т. е. в какой мере оправдывает ожидания применение, например устройств для подогрева, перемешивания массы и теплоизоляция реактора.

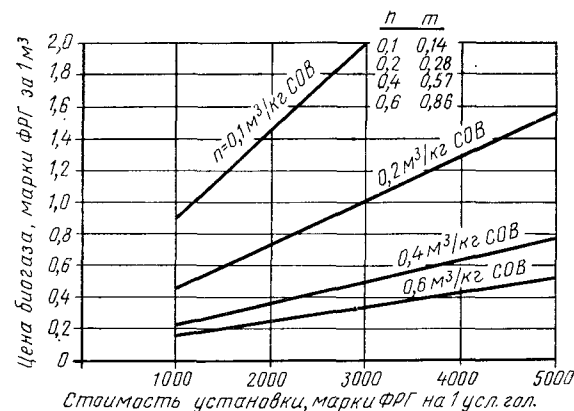


Рис. 34. Цена биогаза в зависимости от первоначальных вложений в установку и удельного выхода полезно используемого газа (n) или удельного выхода общего количества газа (m).

Ниже сделана попытка определить цену биогаза для варианта первоначальных вложений 1 000...5 000 марок ФРГ на 1 усл. гол. продуцентов навоза (ПН) — только в этих пределах колебаний стоимости целесообразно эксплуатировать биогазовую установку — и выхода полезно используемого биогаза 0,2...0,6 м³ на 1 кг сухого органического вещества с учетом требований охраны окружающей среды и использования шлама в качестве удобрения (рис. 34). Из данных этого графика и рисунка 24 можно сделать обратный расчет, какова должна быть в том или ином конкретном случае максимальная стоимость установки, чтобы ее эксплуатация была еще рентабельной. При пересчете на 1 усл. гол. продуцентов навоза (или продуцентов биогаза) нивелируются все различия между удельным выходом газа для разных видов навоза (см. табл. 7).

Формула для расчета цены биогаза:

$$G = \frac{K - (U + D + Z)}{N}, \text{ или } G = \frac{\frac{x}{100} \cdot A + L + Mb - (U + D + Z)}{N}$$

где  $G$  — цена биогаза, марки ФРГ за  $1 \text{ м}^3$ ;  
 $K$  — годовые затраты, марки ФРГ;  
 $A$  — стоимость установки, марки ФРГ;  
 $x$  — доля постоянных затрат, % от  $A$  (амортизационные расходы, уплата процентов, издержки на ремонт и техническое обслуживание, страховые взносы);  
 $L$  — годовые расходы на оплату труда, марки ФРГ;  
 $M$  — общий годовой выход газа,  $\text{м}^3$ ;  
 $v$  — удельные затраты на средства производства (потребность в электроэнергии для привода насосов и т. п.), марки ФРГ на  $1 \text{ м}^3$ ;  
 $U$  — годовая экономия минеральных удобрений, марки ФРГ;  
 $Z$  — годовые дотации от государства, марки ФРГ;  
 $N$  — годовой выход полезно используемого газа,  $\text{м}^3$ .

Расчет можно вести на все предприятие в целом, но также исходя из соображений целесообразности, в удельных показателях на 1 усл. гол. ПН. В отношении отдельных элементов расчета отметим следующее:

х. Доля постоянных затрат принимается равной 10 %, в том числе: 5 % — амортизационные отчисления (срок службы 20 лет), 3,5 % — уплата процентов, 1,5 % — издержки на ремонт, техническое обслуживание и страховые взносы;

А. Стоимость установки принимают равной 1000... 5000 марок ФРГ на 1 усл. гол. ПН. В эту стоимость не входит стоимость резервуара для последующего хранения биошлама, а учитывается стоимость лишь навозоприемника с насосом, поскольку последний необходим и при обычном способе утилизации жидкого навоза;

Л. В основу расчета положена почасовая оплата труда — 12 марок ФРГ за 1 ч и трудоемкость контроля, обслуживания и т. д., равная 0,025 ч на 1 усл. гол. ПН в сутки, что соответствует 108 маркам ФРГ на 1 усл. гол. ПН в год. Эту цифру следует уточнять в зависимости от поголовья животных. В принципе необходимо добиваться того, чтобы установка работала практически без обслуживания. Мы пока не располагаем точными данными по изменению данного критерия в зависимости от вида и размеров установки;

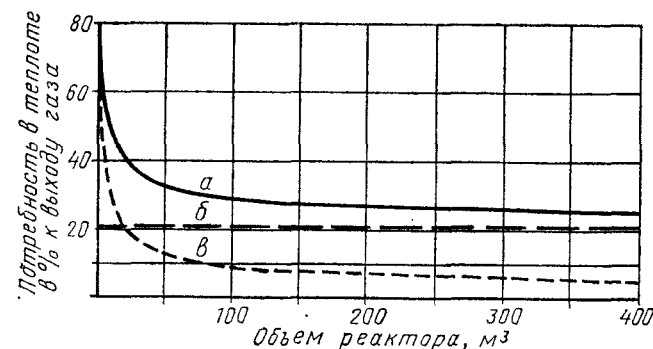


Рис. 35. Потребность в теплоте цилиндрического реактора в зависимости от его объема с учетом потерь теплоты при промывании [24] (по Розеггеру):

$a$  — общая потребность в теплоте;  $b$  — теплота, идущая на подогрев;  $v$  — потери теплоты.

$M/N$ . Под общим годовым выходом газа понимают фактически полученное его количество. Однако часть газа обычно используют для поддержания оптимальной температуры брожения (в противном случае реактор следует обогревать за счет посторонних источников энергии), а остальная часть представляет собой полезно используемое его количество. Потребность в теплоте для обогрева реактора зависит от размеров последнего и теплоизоляции. Величину потребности в теплоте для реакторов ранее сооруженных установок определил Розеггер [93] (рис. 35). При соответствующей теплоизоляции и для малых реакторов эту величину можно уменьшить на 30 % от общего выхода биогаза (теплоизоляция реактора — пятисантиметровый слой пенополиуретана — стоит сегодня около 40 марок ФРГ за  $1 \text{ м}^2$  при общей площади  $400 \text{ м}^2$ ). Значения  $M$  и  $N$  получают, исходя из суточного выхода навоза 5 кг сухого органического вещества на 1 усл. гол. ПН и полезно используемого количества биогаза 0,2...0,6  $\text{м}^3$  на 1 кг сухого органического вещества. Для ориентировочного расчета и определения цены биогаза этих данных достаточно. В действительности же

выход газа, доля его, идущая на покрытие собственных потребностей установки в теплоте, а также полезно используемое количество газа в расчете на 1 кг сухого органического вещества в течение года непостоянны, а зависят, например, от времени года;

в. Удельные затраты на собственные производственные нужды можно предварительно оценить лишь весьма приближенно; они в значительной степени зависят от технологии процесса, кроме того, отсутствуют какие-либо точные данные о них. В ранее применявшихся установках эти затраты составляли 0,2 кВт·ч на 1 м<sup>3</sup> биогаза. Коммунальные установки для очистки сточных вод с несколько другой целевой направленностью расходуют 0,5 кВт·ч на 1 м<sup>3</sup> газа. Однако эта цифра представляется очень высокой для современных сельских биогазовых установок. Соответствующие затраты для них оцениваются в 0,05...0,1 кВт·ч на 1 м<sup>3</sup>. При среднем тарифе 0,15 марки ФРГ за 1 кВт·ч стоимость 1 м<sup>3</sup> биогаза увеличивается примерно на 1 пфенниг ФРГ ( $\epsilon = 0,01$ );

U. Сельскохозяйственные предприятия во всевозрастающем масштабе вынуждены нести расходы по охране окружающей среды, практически на устранение запахов. Если хозяйство, исходя из своего месторасположения, вынуждено прибегать к расходам на охрану окружающей среды, можно ориентироваться только на обычно принятые затраты на аналогичные мероприятия, например на сооружение герметичных навозохранилищ, предотвращающих распространение запахов во время хранения (9 марок ФРГ на 1 усл. гол. ПН в год), и на аэрацию навоза для этой же цели перед внесением его в почву (14...21 марка ФРГ на 1 усл. гол. ПН). В сумме эти затраты оцениваются примерно в 25 марок ФРГ на 1 усл. гол. ПН в год.

D. Точными данными о дополнительной прибыли, получаемой по сравнению с использованием обычного жидкого навоза, мы пока не располагаем. Гофман [41] приводит следующие цифры средних потерь при хранении: твердого навоза — 25% сухого вещества и 33% азота; обычного жидкого (бесподстилочного) навоза соответственно — 0 и 15%. Ес-

ли использование питательных веществ увеличивается на 15%, то получаем прибыль примерно 1,2 марки ФРГ на 1 м<sup>3</sup> биошлама и 19 марок ФРГ на 1 усл. гол. ПН в год.

Z. Здесь не следует учитывать субсидии на капитальное строительство. В каждом конкретном случае необходимо прибавлять непосредственно к стоимости установки (см. рис. 34) субсидии из расчета на 1 усл. гол. ПН. Цена биогаза определяется исходя из минимальной стоимости установки.

Как видно из рисунка 24, биогаз должен стоить не более 0,24 марки ФРГ за 1 м<sup>3</sup> с учетом 35% стоимости за эксплуатацию цистерн, если им хотя бы заменить котельное топливо, которое можно приобрести сейчас по цене около 0,3 марки ФРГ за 1 л. На рисунке 34 показано, что это можно получить при самом оптимистичном расчете и только при очень высоком выходе полезно используемого газа и очень низкой стоимости установки. Стоимость установки свыше 1500 марок ФРГ на 1 усл. гол. ПН вряд ли может быть приемлемой без дотаций. Эти дотации можно назвать лишь ориентировочно, но они должны послужить исходным пунктом для будущих исследований. Следует обратить внимание на то, что это справедливо лишь для того случая, когда весь полученный биогаз (за вычетом необходимого расхода на нужды установки) будет действительно использован (рис. 31...33), иначе фактическая цена газа значительно возрастет.

Влияние изменения отдельных элементов расчета на цену биогаза представлено на рисунке 36, причем только для выхода газа 0,2 м<sup>3</sup> на 1 кг сухого органического вещества. Изменяются, например:

- годовая доля постоянных затрат до 12 % (в результате уменьшения срока службы или увеличения доли затрат на техническое обслуживание);
- годовые затраты на оплату труда до 72 и 216 марок ФРГ на 1 усл. гол. ПН;
- удельные затраты на собственные производственные нужды до 0,02 марки ФРГ на 1 м<sup>3</sup>.

Из вышесказанного ясно, как сильно колеблется цена биогаза и как важно, с другой стороны, знание точных данных, характеризующих особенности рассматриваемой технологии.

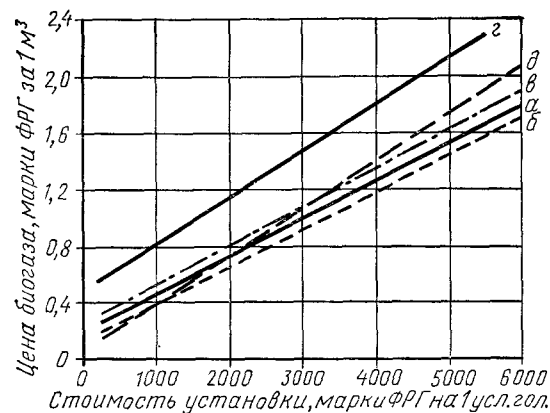


Рис. 36. Цена биогаза в зависимости от стоимости установки для выхода полезно используемого биогаза  $n=0,2 \text{ м}^3$  на 1 кг сухого органического вещества при изменении отдельных элементов расчета.

| Доля постоянных затрат, % | Годовые затраты на оплату труда, марок ФРГ на 1 усл. гол. ПН | Удельные затраты на средства производства, марок ФРГ на 1 м³ |
|---------------------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| 10 (а)                    | 180                                                          | 0,01                                                         |
| 10 (б)                    | 72                                                           | 0,01                                                         |
| 10 (в)                    | 108                                                          | 0,01                                                         |
| 12 (г)                    | 216                                                          | 0,02                                                         |
| 12 (д)                    | 72                                                           | 0,02                                                         |

а — без учета воздействия на окружающую среду.

### Итоги и перспективы

В первой части своей работы мы привели систематический обзор современного состояния научных знаний о технологии метанового брожения с обобщением наиболее существенных западногерманских и зарубежных литературных источников. Было указано также на пробелы в наших знаниях по этому вопросу.

Во второй части подробно рассмотрены основные гочки зрения, важные для оценки экономичности сельской биогазовой установки. Для этой цели были подобраны главным образом качественные и количественные данные о хранении биогаза, подготовке его к применению, а также о его использовании в сельскохозяйственном производстве. Путем составления баланса получения и расходования газа для трех модельных хозяйств с биогазовыми установками и теоретического расчета

экономичности последних была сделана попытка дать читателю четкое представление об основных трудностях практической эксплуатации установки наряду с обеспечением надежного выполнения ею своей технической функции. Речь идет о двух главных трудностях: весьма неустойчивом преимуществе в экономичности по сравнению с сегодняшней стоимостью других видов энергии и сложностью обеспечения устойчивого баланса между производством и потреблением биогаза.

С точки зрения современного состояния науки сооружение и эксплуатация биогазовых установок для всех имеющихся в ФРГ размеров хозяйств технически вполне выполнимы. Однако предварительно определить экономичность таких установок невозможно из-за того, что не хватает данных о минимальных затратах на сооружение установки и ее эксплуатацию. Эти данные должны быть получены при максимальном использовании техники в типичных для сельскохозяйственного производства условиях с учетом размеров хозяйств. Очевидные преимущества биогазового метода по сравнению с аэробным разложением сельскохозяйственных отходов, в особенности отходов животноводства, с точки зрения требований охраны окружающей среды все еще не поддаются количественной оценке, поскольку отсутствуют систематические исследования в этом направлении.

Выход газа и его энергетический потенциал могут колебаться в широких пределах, поскольку они очень сильно зависят от вида, состава и состояния имеющихся исходных материалов, а также от характера процесса брожения и управления им. Кроме того, биогазовая установка, которая должна иметь высокий энергетический КПД, требует создания постоянных и соответствующих используемому составу субстрата оптимальных условий производства в отношении количества загружаемого органического вещества, времени брожения, температуры процесса и перемешивания сбрасываемой массы. Чем выше требования, предъявляемые к КПД биогазовой установки, тем больше затраты на ее техническое оснащение. Поэтому биогазовые установки могут быть экономичными в эксплуатации только при очень большой вместимости реактора.

При определении экономичности ориентируются на современную цену котельного топлива, поскольку главным образом этот вид топлива подлежит замене на био-

газ, и исходят из расчетных факторов, которые максимально отражают реальную действительность. И в данном вопросе отчетливо проявляется упомянутая выше трудность — отсутствие различных точных данных по новым установкам. Поэтому требуют уточнения:

- потребность в энергии на подогрев субстрата;
- потребность в энергии на собственные нужды для перемешивания и перекачки субстрата ( $\text{кВт/м}^3$ );
- долговечность технических объектов;
- затраты на ремонт и техническое обслуживание (марок ФРГ в год);
- удельные затраты рабочего времени (марок ФРГ на  $1 \text{ м}^3$  или ч на 1 усл. гол.);
- затраты на охрану окружающей среды (марок ФРГ на 1 усл. гол.);
- возможная удобрительная ценность биошлама (марок ФРГ на 1 усл. гол.).

С изменением исходных факторов изменяется и экономичность. В особенности следует считаться в будущем с растущей стоимостью энергии. Чем дороже станет энергоноситель, с которым ведется сравнение, — жидкое топливо (или также электроэнергия), тем больше будет заинтересованность в биогазовых установках. Имея в виду аспект надежности энергоснабжения, необходимо проверить, оправдывает ли это дотации на строительство. Однако в наши дни представляется возможным гарантировать экономичность биогазовых установок только в очень узких пределах:

- удельные первоначальные затраты 1 000...2 000 марок ФРГ на 1 усл. гол. Это предвещает тенденцию к применению одnoreакторной схемы непрерывного действия для небольших установок;
- высокий удельный выход полезно используемого газа — не менее  $0,4 \text{ м}^3$  биогаза на 1 кг сухого органического вещества. Повышение выхода полезно используемого газа представляется возможным благодаря применению других побочных видов энергии, рекуперации теплоты и посторонних источников энергии, хотя бы частично для подогрева субстрата.

Чтобы понизить собственную потребность установки в энергии, необходимо предъявлять жесткие требования к устройству реактора (его форме и теплоизоляции) и к механизмам перемешивания. При этом нужно допол-

нительно принимать меры по утилизации отбросного тепла шлама в теплообменнике.

Нарушение баланса расхода и потребления биогаза немедленно сказывается на экономичности установки. Среднее предприятие сначала имеет неуравновешенный газовый баланс, только специализированные предприятия будут иметь уравновешенный баланс. Обеспечение такого баланса — решающий фактор для экономичности установки. Выше были перечислены различные отправные точки для продолжающихся в этом направлении исследований. Видимо, нельзя будет обойтись без промежуточного хранения запасов газа в газгольдерах. Многореакторные установки, работающие с попеременным использованием отдельных реакторов, требуют газгольдеров большей вместимости.

При проектировании сельскохозяйственной биогазовой установки следует проверить, действительно ли оправдывает фактическая потребность производства в биогазе его высокий выход из отходов, так как при ограниченном использовании потенциала газа можно значительно понизить затраты на установку и ее эксплуатацию.

Чтобы можно было в будущем лучше калькулировать и проектировать биогазовые установки, представляется целесообразным получить четкие данные по следующим пунктам:

- снижение потребности в энергии путем а) систематических исследований по перемешиванию субстрата с различной вязкостью и с различным содержанием крупных частиц, причем исследования следует вести с учетом формы и размеров реактора, б) установления оптимального сочетания газового двигателя и генератора с учетом покрытия собственных потребностей установки в теплоте (за счет теплоты системы охлаждения двигателя) и электроэнергии для привода механических агрегатов, включая тепловой насос для вторичного использования отбросной теплоты; в) разрушения плавающей корки энергосберегающим способом;
- упрощение эксплуатации (контроля, управления, регулирования);
- повышение срока службы установки (уменьшение разрушений от коррозии и изнашивания благодаря

- применению соответствующих материалов и новых принципов конструирования);
- снижение стоимости установки путем применения новых экономичных принципов конструирования, в том числе разработки более простых и дешевых съемных емкостей, монтируемых на реактор для сбора газа в установках, работающих с газгольдером;
  - разработка моделей для конкретных технологических решений, предусматривающих различные цели процесса (применение конечных продуктов, защита окружающей среды) и производственное подчинение установки: сельскохозяйственные частные предприятия различного масштаба, производственные объединения (например, для одного села);
  - сооружение установок-прототипов по выбранным моделям и анализ их практической ценности.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

### Приложение 1.

#### Инструкции по применению опасных рабочих веществ

Издательство «Модерне индустри», Вольфганг Думмер и К°, Эрек-  
брейтштейнер штр. 36, 8000, Мюнхен 50.

#### ИНСТРУКЦИЯ № М09. МЕТАН

|                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Опасная зона</p>   | <p><b>Метан</b></p> <p>Поставляется в баллонах высокого давления (в сжатом виде).<br/>Другие названия: рудничный газ, природный газ, болотный газ,</p>                                                                                                                                                                                                                                           |
| <p>Рабочее место</p>  | <p>Бесцветный, но растворяющийся в воде, не имеющий запаха, неядовитый, легковоспламеняющийся газ; значительно легче воздуха. С кислородом или воздухом образует взрывоопасную смесь. Горит голубоватым пламенем. Удушливый газ! Обладает слабым наркотическим действием. Возможны отравления примесями.</p>  |

#### А. Правила техники безопасности

1. Предусмотреть хорошую вентиляцию помещения и отсасывание воздуха через потолочные шахты. Обозначить взрывоопасную зону. Обеспечить водяную завесу над установками и резервуарами. Принять меры предупреждения против накопления электростатического заряда и исключения источников загорания. Разработать план действий в случае аварии!
2. Привести в состояние готовности огнетушители класса С и кошку в рабочем помещении. Местонахождение газа обозначить специальными табличками.
3. Перед началом работ удалить воздух из установки. Применять герметичную заземленную аппаратуру, подключать ее к отсасывающей системе и выводить отсос наружу. Снабдить трубопроводы предупреждающими знаками и затворами, устанавливае-

- мыми в безопасных местах. Сделать стандартные надписи (по трафарету) «Метан». Проводить регулярные испытания на герметичность (регистрация в специальном журнале). Аппаратуру и печи в рабочем состоянии не открывать, предварительно продув азотом. При утечке газа срочно покинуть рабочее помещение. Возвращаться в это помещение только с тяжелым респираторным аппаратом. Потерявшие герметичность баллоны немедленно вынести из помещения и осторожно опорожнить под наблюдением. При работе с очень большим количеством газа, а также при заполнении транспортных цистерн необходимо огородить опасную зону для предотвращения допуска посторонних лиц и исключить возможность возникновения очагов загорания в этой зоне. Не хранить запасные баллоны в рабочем помещении. Батареи или комплекты баллонов снабдить общим запорным краном.
4. Хранить в отдалении от электроприборов, открытого пламени и источников искрообразования. Запрещается курить и проводить сварочные работы в рабочем помещении. Если в охраняемой зоне возможны утечки газа, исключить возможность возникновения очагов загорания и вне зоны. При хранении под открытым небом избегать воздействия солнечного излучения на газовые баллоны, при возможности предусмотреть орошение их водой.
  5. При содержании кислорода менее 2% по объему никакой опасной реакции не происходит. Наибольшей взрывной силой обладает газозоогазодушная смесь при содержании метана 9,4%. Не смешивать метан с ацетиленом, хлором, двуокисью азота, фтором, четырехокисью азота.
  6. При хранении и в процессе производства следить за герметичностью резервуаров и устанавливать их в вертикальном положении в хорошо вентилируемом месте. Не хранить вместе с легковоспламеняющимися веществами. Не ставить в запасных выходах и рабочих помещениях. Запрещается заполнение и опорожнение баллонов в складских помещениях. Резервуары следует заполнять сжиженным газом только на 95%, хранить отдельно от других газов, чтобы можно было эффективно ликвидировать утечку газа. Газ должен быть свободен от цианистого водорода и соединений серы.
  7. При транспортировке плотно завинчивать защитные колпаки и глухие гайки.
  8. Для газовых баллонов с запорным краном W 21, 80×1/4" предусматривается левая резьба. Краны должны открываться без особого усилия. При замене баллонов всегда испытываются на герметичность краны как заполненных, так и пустых баллонов. Шланги проверять не реже чем раз в полгода. В трубопроводах устанавливать устройства, предотвращающие обратный удар, если в них могут проникнуть газы, способствующие горению.
  9. При изменении состава заполнителя или смесей в пределах более 2% по объему не удалять надпись «Метан», а лишь перечеркнуть ее.
  10. Принятие пищи, питье и хранение продуктов питания в рабочем помещении запрещаются.
  11. При утечке газов в закрытых помещениях входить туда только с тяжелым респираторным аппаратом. Контролировать концентрацию газа в воздухе с помощью теста Дрегерга на природный газ.

12. Необходимо регулярно повторять обучение рабочих с занесением их росписей в специальный журнал. Соблюдать ограничения по допуску к работе с газом согласно § 15 инструкции по рабочим веществам.
13. Маркировать резервуары с газом в соответствии с TRG символом опасности «Огонь» и названием вещества, а также нанести на баллоны красную полосу.

#### Б. Правила противопожарной безопасности и меры предотвращения аварий

1. Применять песок или порошковый огнетушитель! Выходящий газ можно сбить водяной струей под давлением. Находящиеся рядом резервуары и баллоны интенсивно охлаждать струей воды. Взрывоопасно! Использовать только взрывобезопасную вспомогательную аппаратуру.
2. Использовать тяжелые респираторные аппараты.
3. При перевозке по автодорогам больших количеств газа руководствоваться инструкцией по технике безопасности CEFIC и следовать ей в случае аварии.

#### В. Правила охраны здоровья людей

1. **Характер действия и токсичность.** Метан в нормальных условиях представляет собой удушливый газ с незначительным собственным действием на организм и может вызвать остановку дыхания, препятствуя поступлению кислорода. Наркотическое действие возникает только при вдыхании газа под давлением. Многочасовое вдыхание смеси из 5 объемных долей метана и 1 объемной доли кислорода не оказывает наркотического действия. При концентрации 330...520 мг/л вызывает головную боль и сонливость (продолжительность воздействия не приводится). Разница между наркотической и токсичной дозами незначительна.
2. **Первая помощь.** Пострадавшего как можно быстрее вынести из помещения. Покой. В легких случаях необходимо глубоко вдыхать свежий воздух; в более тяжелых — освободить дыхательные пути, уложить пострадавшего на спину, голову отклонить назад и при необходимости начать делать искусственное дыхание. Транспортировать в положении лежа на боку.
3. **Врачебная помощь.** Вдыхание кислорода, инъекции лобелина и по возможности антидоты, как при отравлении CO.

| Формула                                       | CH <sub>4</sub>        | МАК*                             | —                                        |
|-----------------------------------------------|------------------------|----------------------------------|------------------------------------------|
| Молекулярная масса                            | 16,0                   | Критическая точка:               |                                          |
| В газообразном состоянии:                     |                        | Температура                      | — 82,5 °C                                |
| Плотность                                     | 0,72 кг/м <sup>3</sup> | Давление                         | 4,63 МПа                                 |
| Относительная плотность (плотность воздуха=1) | 0,55                   | Плотность                        | 0,162 кг/л                               |
| Точка воспламенения                           | 595 °C                 | Растворимость в воде при 20 °C   | 0,0349 м <sup>3</sup> в 1 м <sup>3</sup> |
| Границы взрывоопасности в % по объему         | 5...15                 | 1 мг/м <sup>3</sup> =1500 млн.—1 |                                          |
| В жидком состоянии:                           |                        | 1 млн.—1=0,667 мг/м <sup>3</sup> |                                          |
| Точка плавления                               | — 182 °C               |                                  |                                          |
| Точка кипения                                 | — 161 °C               |                                  |                                          |
| Плотность                                     | 0,42 кг/л              |                                  |                                          |

\* МАК — максимальная концентрация вредных веществ в воздухе, допускаемая правилами охраны труда.



|                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Опасная зона</p>   | <p><b>Углекислый газ</b><br/>Поставляется в баллонах высокого давления в сжиженном или в твердом (сухой лед) виде.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| <p>Рабочее место</p>  | <p>Бесцветный, невидимый, стойкий, способный к реакциям газ, негорючий, тяжелее воздуха со слабозловонным запахом. Сжиженная углекислота вне герметичной емкости переходит в твердое состояние (сухой лед). Холодный газ, смешиваясь с влажным воздухом, образует туман. В зависимости от концентрации вдыхаемый газ оказывает возбуждающее, опьяняющее или удушающее действие. Резорбция в небольшой мере происходит также через кожу. Жидкая углекислота и сухой лед при попадании на тело вызывают тяжелые обморожения.</p> |

### А. Правила техники безопасности

1. Предусмотреть хорошую приточную и отточную вентиляцию помещения. В случае возможного скопления большого количества углекислого газа требуется отсасывающее устройство в месте выхода или появления газа. Шахты и каналы должны быть защищены от проникновения газа.
2. Огнетушители разместить в местах нахождения горючих материалов. Флакон с жидкостью для промывания глаз поместить на видном месте в рабочем помещении. Местонахождение газа и запасные выходы обозначить специальными табличками. Двери и окна запасных выходов должны открываться наружу. В больших раздвижных дверях должны открываться наружу. В больших раздвижных дверях должна быть сделана дополнительная откидная дверь.
3. В производстве по возможности использовать герметичную аппаратуру. Регулярно контролировать герметичность. При нарушении герметичности или выходе установки из строя немедленно покинуть помещение и возвратиться в него только с автономным респираторным аппаратом. При этом необходимо присутствие не менее чем двух человек.
4. Устанавливать баллоны в отдалении от открытого огня и источников теплоты. На открытом воздухе избегать воздействия солнечной радиации. При обнаружении дефектов резервуаров,

представляющих опасность для персонала или третьих лиц, немедленно выпустить из емкостей газ.

5. Углекислый газ может активно реагировать с различными веществами, в особенности при повышенных температурах, поэтому его нельзя считать универсальным противопожарным средством. При смешивании с аммиаком, этиламиноном, метиламином, диметиламиноном и триметиламиноном возможны опасные реакции. При быстром снижении давления до нормального жидкая углекислота затвердевает, охлаждаясь до  $-79^{\circ}\text{C}$ , и превращается в сухой лед, который, плавясь, быстро испаряется.
6. При складировании и в процессе работы газовые баллоны высокого давления следует хранить плотно закрытыми в хорошо проветриваемом месте. Нельзя хранить их рядом с легковоспламеняющимися веществами, в запасных выходах и рабочих помещениях, а также в непосредственной близости от них. Заполнение и опорожнение баллонов в складских помещениях запрещается. Резервуары следует заполнять сжиженным газом не более чем на 95%. Если жидкую углекислоту заливают в баллоны в помещениях, то эти помещения должны быть хорошо проветриваемыми и находиться на первом этаже или на высоте разгрузочной эстакады.
7. Углекислый газ в сжиженном виде транспортируется в баллонах высокого давления. При перевозке завинтить до отказа защитные колпаки и глухие гайки.
8. Резьбовой кран газового баллона W 21.80  $\times 1/4$ ", а также краны R1 для присоединения огнетушительного устройства должны открываться без большого усилия. При замене баллонов всегда следует проверять на герметичность краны как заполненных, так и пустых баллонов. Не стравливать углекислый газ в закрытых помещениях. При отборе газа баллоны должны быть только в вертикальном положении. Шланги проверять не реже чем один раз в полгода. Применяемые материалы должны хорошо противостоять возможным механическим, химическим и термическим нагрузкам. Для обнаружения газа и оценки его концентрации использовать набор испытательных трубок Дрегера.
9. Прием пищи, питье и хранение продуктов питания на рабочем месте запрещаются.
10. Во время работы носить защитную одежду и перчатки из кожи или плотной ткани. В случае утечек газа в закрытых помещениях пользоваться только автономным респираторным аппаратом. При работе с сухим льдом принимать меры для защиты от обморожения.
11. Проводить регулярное обучение рабочих с занесением их росписей в специальный журнал. При приеме на работу обучать профессиональные ограничения в соответствии с § 15 инструкции о рабочих веществах.
12. Резервуары снабжать надписями с названием содержащихся в них веществ. Применять только разрешаемые законом емкости.

### Б. Правила противопожарной безопасности и меры предотвращения аварий

1. Углекислый газ не горит. Противопожарные мероприятия организовывать в соответствии с окружающей обстановкой. Резер-

вуары, находящиеся в зоне загорания, охлаждать разбрызгиваемой водой, вынести из опасной зоны — взрывоопасны! Выходящий газ растекается по полу и, смешиваясь с влажным воздухом, образует туман. Вытекающая жидкость имеет очень низкую температуру и немедленно затвердевает, превращаясь в снегообразную массу, которая быстро испаряется. Опасно: люди могут задохнуться, особенно в закрытых или расположенных под землей помещениях! Остерегаться обморожений тела. Оставаться на наветренной стороне.

2. Необходимо пользоваться автономным респираторным аппаратом.
3. Углекислый газ воду не отравляет.
4. В соответствии с дорожно-транспортным законодательством при перевозке по автодорогам большого количества газа необходимо устанавливать специальные знаки на автомобиле — оранжевые предупредительные таблички с соответствующими цифровыми символами, а также иметь с собой инструкции по технике безопасности.

## В. Правила охраны здоровья людей

1. **Характер действия и токсичность.** Углекислый газ в высоких концентрациях парализует дыхательный центр. При низких концентрациях избыток или недостаток кислорода играет решающую роль в интенсивности и протекании процесса отравления углекислым газом. В зависимости от продолжительности вдыхания при отсутствии достаточного поступления кислорода 8...10% (по объему)  $\text{CO}_2$  может вызвать головные боли, шум в ушах, головокружение, повышение кровяного давления, тахикардию, учащенное дыхание или одышку, цианоз, возбужденное состояние, тошноту. При концентрации свыше 10% — атаксию, иногда эпилептиформные судороги, потерю сознания, падение кровяного давления. При своевременной подаче свежего воздуха болезненные явления быстро прекращаются, в противном случае может наступить удушье! При концентрации свыше 18...20% — состояние, напоминающее апноэ. В случае контакта кожи с жидким  $\text{CO}_2$  или сухим льдом — покраснение и опухание ее, возможно образование волдырей. В отдельных случаях более или менее глубокое повреждение ткани. Сильные боли.
2. **Первая помощь.** Пострадавшего немедленно вынести из опасной зоны. Обеспечить поступление свежего воздуха. В закрытых помещениях — одеть респиратор. Покой, тепло, при необходимости искусственное дыхание. Освободить дыхательные пути. Следить за пульсом, при необходимости сделать массаж сердца. При потере сознания транспортировать в положении на бок.
3. **Врачебная помощь.** Принудительное вдыхание кислорода (при рвоте — введение кислорода в легкие специальным способом), в крайнем случае необходимы интубация и контроль газового состава крови (кислотно-щелочного баланса); соответствующие терапевтические действия путем введения тригидроксиметиламинотетана (триспуффера) и др. Далее — в зависимости от симп-

томов. При сильных болях в кожном покрове ввести под кожу 1 ампулу гидроморфонгидрохлорида. Следить за дыханием и пульсом. Внутримышечно — 2 ампулы метилпреднизолона.

| Формула                          | $\text{CO}_2$       | МАК                                             | 5000 млн. — <sup>1</sup> |
|----------------------------------|---------------------|-------------------------------------------------|--------------------------|
| Молекулярная масса               | 44,01               |                                                 |                          |
| <b>В газообразном состоянии:</b> |                     |                                                 |                          |
| Плотность                        | 1,98 г/л            | <b>В твердом состоянии:</b>                     |                          |
| Относительная плотность газа     | 1,53                | Температура сублимации                          | —78,5 °C                 |
| Растворимость в воде:            |                     | Плотность (при —79 °C)                          | 1,56                     |
| при 0 °C                         | 171 мл в 100 мл     | <b>Критическая точка:</b>                       |                          |
| при 25 °C                        | 75,7 мл в 100 мл    | Температура                                     | 31,0 °C                  |
| <b>В сжиженном состоянии:</b>    |                     | Давление                                        | 7,4 МПа                  |
| Тройная точка                    |                     | Плотность                                       | 0,47 кг/л                |
| температура                      | —56,57 °C (216,6 K) | Давление паров при 20 °C                        | 5,72 МПа                 |
| давление                         | 0,51 МПа            | (в жидком состоянии)                            |                          |
| плотность                        | 0,81 кг/л           | 1 мг/м <sup>3</sup> = 0,545 млн. — <sup>1</sup> |                          |
|                                  |                     | 1 млн. — <sup>1</sup> = 1,833 мг/м <sup>3</sup> |                          |

## Опасная зона



## Сероводород

Поставляется в баллонах высокого давления. Применяется частично при работе газогенераторов Кипа

Другие названия: сероводородная кислота, сульфид водорода.

## Рабочее место



Ядовитый, растворимый в воде жидкий газ, бесцветный, очень легковоспламеняющийся; образует с воздухом взрывоопасную смесь. Газ немного тяжелее воздуха, в определенной концентрации пахнет тухлыми яйцами. При длительном воздействии и повышенной концентрации ощущение запаха может притупиться, поэтому этот признак обнаружения ненадежен! Оказывает раздражающее действие на глаза и дыхательные пути. Кожей всасывается незначительно; тяжелый дыхательный яд. Возможен отек легких.



## А. Правила техники безопасности.

1. Предусмотреть очень хорошую вентиляцию рабочего помещения и отсасывание воздуха на уровне пола. Обеспечить эффективное отсасывание газа в месте его выделения. Обозначить взрывоопасную зону. Принять меры предупреждения против накопления электростатического заряда. При возможности иметь спринклерную установку!
2. Держать в состоянии готовности огнетушители класса С и кошму, а также флаконы с жидкостью для промывания глаз. В случае необходимости работы с большим количеством газа предусмотреть индивидуальные души. Местонахождение газа обозначить специальными табличками.
3. Применять в работе герметичную заземленную аппаратуру и предусмотреть систему отсоса. Отбросной газ выводить наружу через сепаратор-ловушку. Следить за поступлением газа в помещение. Вытяжной вентилятор снабдить предупреждающим символом «Яд». Регулярно контролировать герметичность! В случае утечки газа как можно быстрее покинуть рабочее помещение. Возвращаться в помещение только с тяжелым респиратором.

торным аппаратом. Запасные баллоны в помещении не хранить. Эксплуатация и очистка газогенераторов  $H_2S$  — только при наличии отсоса.

4. Хранить вдали от электроприборов, открытого огня, источников теплоты и искрения. Категорически запрещается курить и вести сварочные работы в помещении.
5. Во влажном воздухе и при повышенной температуре почти все металлы под воздействием  $H_2S$  образуют сульфиды. Серебро, медь, марганец, олово и их сплавы непригодны для использования в качестве конструкционных материалов. Электрические контакты надо регулярно проверять на наличие коррозии.  $H_2S$  реагирует с окислителями, в отдельных случаях вплоть до воспламенения (с образованием  $SO_2$ ). При выпуске газа в открытое пространство образуется большое количество холодного тумана.  $H_2S$  может также образовываться в опасном количестве из сульфидов при контакте их с кислотами. Опасные реакции возможны с этиламино, окисью этилена, аммиаком, хлором, диметиламино, двуокисью азота, фтором, метиламино, сернистым ангидридом, четырехокисью азота, триметиламино. С кислородом не вступает в опасную реакцию только при концентрации менее 2% по объему.
6. При складировании и в производстве обращать внимание на герметичность баллонов. Хранить в закрытом холодном месте. Предохранять от падения, не кантовать! Не хранить вместе с горючими и легковоспламеняющимися веществами. Не хранить на лестничных клетках, в коридорах и проходах. Заполнение и опорожнение баллонов в складских помещениях запрещается.
7. При перевозке плотно завинтить защитные колпаки и глухие гайки.
8. Краны баллонов на стандартной левой резьбе должны открываться без особого усилия. При замене баллонов краны как на заполненных, так и на пустых баллонах проверять на герметичность.
9. Прием пищи, питье и хранение продуктов питания на рабочем месте запрещаются.
10. Носить противопожарную защитную одежду. Пропитанную газом одежду немедленно снять и проветрить. По возможности использовать защитные перчатки и очки. В отдельных случаях применять респиратор с фильтром В (отличительный цвет — серый). При опасности повышенной концентрации газов и спасательных работах использовать только тяжелый респираторный аппарат. Контролировать концентрацию газа в воздухе можно с помощью испытательных трубок Дрегера СН298, 281, 282, 291 или простого индикатора со свинцовоацетатной бумагой.
11. Необходимо регулярно повторять обучение рабочих с занесением их росписей в специальный журнал. Соблюдать ограничения по допуску к работе с газом согласно § 15 инструкции по рабочим веществам. Запрещается принимать на работу людей с болезнями глаз и нервов.
12. Маркировка резервуаров в соответствии с международными стандартами ИМСО символами опасности «Яд» и «Огонь»; резервуары снабжать долговечными, выдавливаемыми в металле названиями газа и метить красной полосой.

## Б. Правила противопожарной безопасности и меры предотвращения аварий

1. Применять специальный углекислотный огнетушитель. Более крупные очаги загорания тушить разбрызгиваемой водой или просто большим количеством воды. Находящиеся поблизости резервуары и баллоны интенсивно охлаждать разбрызгиваемой водой. Взрывоопасен! При пожаре возможно сильное раздражающее действие на глаза и дыхательные пути вследствие образования очень ядовитого сернистого ангидрида. Обращать внимание на вторичное воспламенение. Применять только взрывобезопасные вспомогательные устройства.
2. Носить автономный респираторный аппарат и герметичный противохимический костюм.
3. После ликвидации очага пожара обратить внимание на опасность отравления. Исключить возможность повторной утечки или проникновения жидкости или газа в подвалы, ямы и канализацию.  $\text{H}_2\text{S}$  — отравляющее воду вещество.
4. В соответствии с дорожно-транспортным законодательством при перевозке по дорогам больших количеств  $\text{H}_2\text{S}$  необходимо снабдить автомобиль оранжевой предупредительной табличкой и иметь с собой инструкцию по технике безопасности. Перевозка осуществляется только по специальному разрешению!

## В. Правила охраны здоровья людей

1. **Характер действия и токсичность.** В небольших концентрациях ( $\sim$  до 200 млн.<sup>-1</sup>) — раздражение слизистых оболочек (глаза, дыхательные пути), тошнота, рвота, головная боль, понос, одышка, цианоз, потеря сознания, бред, судороги. Характерно также состояние возбуждения. К смертельному исходу может привести паралич дыхания, который наступает тем быстрее, чем выше концентрация, и в экстремальном случае служит единственным симптомом при так называемом апоплексическом протекании отравления ( $\sim$  при 1400 млн.<sup>-1</sup>). Нарушения деятельности центральной нервной системы и сердца могут продолжаться после пережитого отравления еще длительное время. Обычно остается сверхчувствительность к  $\text{H}_2\text{S}$ . Хронические симптомы: раздражения слизистой оболочки, легкое помутнение роговицы, светобоязнь, бронхит, общая слабость, потеря аппетита, потеря веса и нарушения кровообращения. Характерны также сыпь и кожный зуд.
2. **Первая помощь.** Свежий воздух, при остановке дыхания — искусственное дыхание («рот в рот»). Тепло, покой. Перевозка в лежачем положении. При опасности потери сознания перевозка в положении лежа на боку.
3. **Врачебная помощь.** Как можно быстрее искусственное дыхание (кислородом), при этом не забывать и о собственной безопасности! Применять аналгетики. Затем в зависимости от симптомов контролировать прежде всего функции системы кровообращения и легких. Предупреждать отек гортани. При бронхите можно давать кодеин, как только удастся преодолеть стадию асфиксии. При отеке легких во время латентного периода — высокие дозы преднизолона (внутривенно). Кроме того, инфузия ТНАМ в дозе 0,5 г на 1 кг массы. Абсолютный покой, тепло. Профилактика инфекций. Дыхательные пути освободить путем

отсасывания. Применять морфий только в малых дозах. Против сгущения крови применять пероральное введение жидкости или капельную клизму, но не дополнительные внутривенные введения. При поражении газообразными продуктами сгорания лечение такое же, как и при отравлении  $\text{CO}_2$ .

| Формула                                          | $\text{H}_2\text{S}$    | МАК 10 млн. <sup>-1</sup>                                    |
|--------------------------------------------------|-------------------------|--------------------------------------------------------------|
| Молекулярная масса                               | 34,1                    | Показатели вредного воздействия                              |
| В газообразном состоянии:                        |                         |                                                              |
| Плотность                                        | 1,54 кг/м <sup>3</sup>  | 1W1 0.050 мг/м <sup>3</sup>                                  |
| Относительная газовая плотность                  | 1,2                     | 1W2 0.010 мг/м <sup>3</sup>                                  |
| Точка воспламенения                              | 270 °C                  | Критическая точка:                                           |
| Пределы взрывоопасной концентрации в % по объему | 4,3 ... 45,5            | Температура 100 °C                                           |
| В жидком состоянии:                              |                         | Давление 9,01 МПа                                            |
| Точка плавления                                  | -86 °C                  | Плотность 0,35 кг/л                                          |
| Точка кипения                                    | -60 °C                  | Растворимость в воде 2,723 м <sup>3</sup> в 1 м <sup>3</sup> |
| Плотность                                        | 0,796 кг/л              | Порог восприятия запаха -0,025 ... 0,1 млн. <sup>-1</sup>    |
| Теплота испарения                                | 8,29 кДж/м <sup>3</sup> | 1 мг/м <sup>3</sup> =0,706 млн. <sup>-1</sup>                |
| Давление паров                                   | 1,81 МПа                | 1 млн. <sup>-1</sup> =1,416 мг/м <sup>3</sup>                |

## Приложение 2.

### Правила техники безопасности Объединения сельского и лесного хозяйства Рейнхессен-Пфальц

## РАЗДЕЛ 5. БИОГАЗОВЫЕ УСТАНОВКИ

### ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

При брожении органических веществ (стойлового навоза, гумуса, остатков корма) в навозных ямах, каналах и т. д. в условиях отсутствия кислорода выделяется горючий газ, который по большей части состоит из метана ( $\text{CH}_4$ ) и углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ) и известен под такими названиями, как болотный газ, биогаз и др. Поскольку этот газ можно использовать для отопления и в качестве топлива для двигателей внутреннего сгорания, его получают в специальных установках — биогазовых реакторах. Биогаз не содержит окиси углерода ( $\text{CO}$ ), как светильный газ, и поэтому не ядовит. Однако он может вызвать смерть от удушья, так как не содержит кислорода. В смеси с воздухом (кислородом) биогаз взрывоопасен. Перед тем как входить в бродильные камеры для их очистки, ремонта и т. п., необходимо провентилировать эти емкости с помощью соответствующих устройств, например вентиляторов, до тех пор, пока пламя внесенной туда безопасной рудничной лампы не будет хорошо гореть, не колеблясь, свидетельствуя таким образом о наличии достаточного количества пригодного для дыхания человека воздуха. Проверка открытым пламенем запрещается из-за опасности взрыва. Противогазы не могут служить защитой, так как их можно использовать лишь в том случае, если есть воздух, пригодный для дыхания. К спустившемуся в камеру человеку должна быть привязана крепкая веревка, другой конец которой постоянно находится в руках у двух человек, чтобы в случае опасности — выхода из строя безопасной рудничной лампы — они могли сами вытащить его наружу, не спуская в опасную зону еще одного рабочего. Как правильно прикреплять веревку, показано на иллюстрациях к разделу 3.

### Предписания

#### § 1. Область применения

Перечисленные ниже правила техники безопасности распространяются на биогазовые установки вместимостью до 100 м<sup>3</sup>. Для больших установок действуют правила, изданные профессиональным объединением газо- и водоснабжающих предприятий.

#### Сооружение установки

- § 2. Биогазовые установки должны быть построены с соблюдением известных технических правил.
- § 3. Предприниматель должен поручить изготовление биогазовой установки специализированной фирме с условием, что эта установка будет соответствовать требованиям § 2 и приведенным ниже правилам техники безопасности и вместе с ней

будет передана подробная инструкция по ее правильному обслуживанию.

- § 4. (1). Бродильные и насосные камеры должны быть оснащены вентилирующими устройствами, которые позволяют быстро проводить полное их проветривание.
- (2) На бродильной камере должна висеть табличка со следующим текстом «Опасность удушья и взрыва! Входить только после полного проветривания и проверки с помощью безопасной рудничной лампы. За опустившимся в камеру должны наблюдать два человека, соединенные с ним веревкой».
- (3) На специально выделенном месте должны находиться приготовленные безопасная рудничная лампа и веревки для привязывания к монтажному поясу.
- (4) Емкости для газа следует располагать на достаточном удалении от жилых домов, складов и общественных дорог. В качестве минимально допустимых рекомендуются следующие расстояния: от домов с мягкой кровлей — 10 м; от домов с твердой кровлей — 5 м, от общественных дорог — 5 м, если местными властями не предусмотрены другие ограничения. Если биогазовые установки расположены не внутри усадьбы, они должны быть ограждены забором во избежание проникновения посторонних лиц на их территорию.
- (5) С помощью прочных табличек следует запретить курение и разжигание огня вблизи газовых резервуаров.
- § 5. Электрические установки во взрывоопасных помещениях должны соответствовать инструкциям Союза немецких электротехников по сооружению электрических установок во взрывоопасных производственных объектах (VDE 0165) и для взрывозащищенных электрических средств производства (VDE 0171).

#### Эксплуатация установок

- § 6. Самостоятельное обслуживание и эксплуатацию биогазовых установок можно поручать только компетентным в данной области лицам.
- § 7. Следует выполнять действующие правила обслуживания и эксплуатации. Они должны быть вывешены в производственных помещениях или непосредственно на самой установке.
- § 8. Необходимо регулярно проверять уровень воды в резервуаре газгольдера колпакового типа и подвижность самого колпака. Зимой предотвращать образование ледяной корки.
- § 9. (1) Перед тем как войти в бродильную камеру для ремонта, покрасочных работ, извлечения осадка, следует удалить скопившийся там биогаз путем активной вентиляции с помощью соответствующего оборудования. Входить в камеру можно только тогда, когда с помощью безопасной рудничной лампы установлено наличие достаточного количества пригодного для дыхания воздуха. Заходить в камеру разрешается только с зажженной безопасной рудничной лампой в присутствии двух человек, которые страхуют входящего туда с помощью веревки и монтажного пояса и постоянно наблюдают за горением лампы и состоянием страхуемого.
- (2) В случае аварии поступать в соответствии с § 3, абз. 3 раздела 3.

- § 10. Ремонт резервуаров и трубопроводов должны проводить только специалисты (фирма-изготовитель биогазовых установок). Это особенно важно для всех работ с открытым пламенем и сваркой, проводимых на газгольдере и трубопроводах.
- § 11. Курить, разжигать костры и применять открытое пламя в радиусе до 10 м от газгольдера запрещается.
- § 12. При обновлении предупреждающих надписей на резервуарах придерживаться соответствующих правил, изложенных в § 2 раздела 3.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Abele U. Ertragssteigerung durch Flüssigmistbehandlung KTBL-Schrift Nr. 224, KTBL-Schriftenvertrieb im Landwirtschaftsverlag, Münster-Hiltrup, 1978.
2. Ahrens W. Experimentelle Untersuchungen zur Frage der seuchenhygienischen Unbedenklichkeit von ausgegastem Schlamm (Methangärung). Wiss. Zeitschrift d. Th. Dresden 1956/57, H. 6.
3. Amberg H. F. Dezentrale Kraft-Wärme-Kopplung in einem Klärwerk. Energie 29 (1977), H. 11, S. 374 ff.
4. Baader W. Freisetzung von Wärme aus organischen Reststoffen der landwirtschaftlichen Produktion. Landbauforsch. Völkenrode 26 (1976), H. 3, S. 171—176.
5. Baader W., Bardtke D., Grabbe K., Tietjen C. Behandlung tierischen Exkremente. В кн.: Strauch D., Baader W., Tietjen C.: Abfälle aus der Tierhaltung, Verlag E. Ulmer, Stuttgart, 1977, S. 76—157.
6. Baader W., Schuchardt F., Thaer R., Döhne E. Behandlung organischer Reststoffe aus der landwirtschaftlichen Produktion in biologischen Prozessen. Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes für die Europäische Wirtschaftsgemeinschaft, 1977.
7. Baader W. Aussichten der Biogasgewinnung aus organischen Rest- und Abfallstoffen aus der landwirtschaftlichen Produktion, Kongreßbericht 1. Deutsches Sommerforum, Hamburg, (1977) Bd. 3, S. 133—142.
8. Baader W. Biogasgewinnung im landwirtschaftlichen Bereich—Technische Voraussetzungen und Konsequenzen. Landtechnik 33 (1978), H. 2, S. 61—63.
9. Baader W., Thaer R., Traulsen H. Verfahren zur Behandlung von Abfällen der tierischen Produktion. Ber. Ldw. 50 (1972), S. 612—627, Verlag Paul Parey, Hamburg u. Berlin, 1972.
10. Bartlett H. D., Persson S., Regan R. W., Branding A. E. Experiences from operating a full size anaerobic digester. ASAE Paper 77—4053. American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, Michigan, 1977.
11. Besler H. Kleinbiogasanlage, 1977. Pers. Mitteilung v. Herrn Maurer, Landesanstalt für Maschinenwesen, Hohenheim.
12. Beyer K. Gasbetriebene Wärmepumpe. Gasverwendung 28 (1977), H. 9/10, S. 335 ff.

13. Böhme H. Pers. Mitteilung, Institut für Tierernährung der FAL Braunschweig, 1978.
14. Bremer P. Le potentiel énergétique suisse des gaz des fumier Etude No. 17, Commission fédérale de la conception globale de L'énergie, Vevey, 1976.
15. Bryant M. P. The microbiology of anaerobic degradation and methanogenesis with special reference to sewage. В кн.: Schlegel H. G. Barnea J.: Microbial energy conversion. Verlag E. Goltze KG, Göttingen, 1976, S. 107—117.
16. Bryant M. P., Vareel V. H., Frobish R. A., Isaacson H. R. Biological potential of thermophilic methanogenesis from cattle wastes. В кн.: Schlegel H. G., Barnea J.: Microbial energy conversion. Verlag E. Goltze, KG, Göttingen, 1976, S. 347—359.
17. Buswell A. M. Fundamentals of anaerobic treatment of organic wastes. Sewage Ind. Wastes, 29 (1957).
18. Buswell A. M., Boruff C. S. The correlations between the chemical composition of organic compounds and the amount and quality of gas from sludge digestion. Sewage Works Journal, 454, 1932.
19. Converse J. C., Graves R. E., Evans G. W. Anaerobic degradation of dairy manure under mesophile and thermophilic temperatures. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers 20 (1977), S. 336—340.
20. Converse J. C., Evans G. W., Verhoeven C. R., Gibbon W., Gibbon M. Performance of a large size anaerobic digester for poultry manure. ASAE Paper 77—0451. American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, Michigan, 1977.
21. Converse J. C., Graves R. E. Facts on methane production from animal manure. Fact sheet Univ. of Wisconsin, 1974.
22. Cooney C., Wise D. Thermophilic anaerobic digestion of solid waste for fuel gas production. Biotechnol. Bioeng. 17, (1975), S. 11:19.
23. D'ans J., Lax E. Taschenbuch für Chemiker und Physiker, Bd. 1: Makroskopische physikalisch-chemische Eigenschaften, Verlag, Springer Berlin, Heidelberg, New York, 3. Aufl., 1967.
24. Dohne E., Brenndörfer M. Wie aktuell ist heute Biogas? Landtechnik 29 (1974), H. 7 S. 302—307.
25. Dohne E., Feldmann F. Landtechnik I—Feldwirtschaft. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, 1969.
26. Eyser E. Biogas, einer Studie über die Aktualität der Biogasgewinnung. Abschlußarbeit, Gesamthochschule Kassel, 1976.
27. Fair G. M., Moore E. W. Observations on the digestion of a sewage sludge over a wide range of temperature. Sewage Works J. 9 (1937) S. 3.
28. Feldmann F. Biogas—energiemäßig gesehen. Landtechnische Forschung, 4 (1954), H. 3, S. 65—78.
29. Fischer J. R., Iannotti E. L., Porter J. H., Garcia A. Producing methane gas from swine manure in a pilot-size digester. ASAE Paper MC 77—604. American Society of Agricult. Engineers, St. Joseph, Michigan, 1977.
30. Fischer J. R., Meador N. E., Sievers D. M., Fulhage C. D., Lannotti E. L. Design and operation of a farm-size anaerobic digester for swine. ASAE Paper 77-4052, American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, Michigan, 1977.
31. Gaertner A., Ikonomoff S. D. Faulschlamm (Gasanlage) «System Berlin». Städtehygiene 7 (1956), S. 110—113.
32. Ghosh S., Conrad J. R., Klass D. L. Water Pollut. Control Fed. 47 (1975), H. 1, S. 30.
33. Görlicke P. Bivalente Heizungen — Gedanken zur Wärmepumpenanwendung. Flüssiggas-Dienst 23 (1977), H. 2, S. 95 ff.
34. Götz G. Die Biogasgewinnung ohne Schwimmdecke «System München». В кн.: Liebmann H.: Gewinnung und Verwertung von Methan aus Klärschlamm und Mist, Verlag R. Oldenbourg, München, 1956, S. 269—278.
35. Gooding B. Power from pigs. New Zealand Farmer, April 1976, S. 14/15.
36. Heike T. Speicherung von Erdgas. Sonderdruck aus der Festschrift 100 Jahre SVGW des Schweiz. Vereins von Gas- und Wasserfachmännern, Zürich 1973.
37. Hein K. Betriebserfahrungen mit einer Mehrmotoren-BHKW-Anlage zur Beheizung eines Hallenbades. VDI-Berichte Nr. 287 (1977), S. 25 ff.
38. Hein M. E., Smith R. J., Vetter R. L. Anaerobic digestion of beef manure and corn stover. ASAE Paper 75—4542. American Society of Agric. Engineers, St. Joseph, Michigan, 1975.
39. Hein M. E., Smith R. J., Vetter R. L. Some mechanical aspects of anaerobic digestion of beef manure. ASAE Paper 77—4056. American Society of Agric. Engineers, St. Joseph, Michigan, 1977.
40. Heyl L. V., Ayik M., Boxberger J. Elektrischer Leistungsbedarf und Energieverbrauch verschiedener Arbeitsverfahren der landwirtschaftlichen tierischen Produktion und energiewirtschaftliche Folgerungen. Forschungsbericht des Instituts und der Bayerischen Landesanstalt für Landtechnik der TU München, Freising-Weihenstephan, VDEW, Frankfurt/M., 1975.
41. Hoffmann H. Gülle verbessert die Bodenfruchtbarkeit. Hanoversche land- und forstwirtschaftliche Zeitung 130 (1977), H. 29, S. 12—15.
42. Hoyer H. Verfahren der Flüssigmistausbringung. KTBL-Schrift Nr. 209. Landwirtschaftsverlag, Münster-Hiltrup, 1977.
43. Hutt W., Oelschläger W. Einfluß der Brenneremissionen auf die Gehalte an anorganischen Ablagerungen auf Körnerfrüchten bei direktbeheizten Trockungsanlagen. Grundlagen der Landtechnik 26 (1976). Nr. 4 S. 134 ff.
44. Inden P. P. Mikrobielle Methanfermentation aus Biomasse durch anaerobe Fermentation im technischen Maßstab. Diss. TH Aachen, 1977. In: Berichte der Kernforschungsanlage, Jülich Nr. 1463, 1977.
45. Jewell W. J. (Herausgeber) Bioconversion of agricultural wastes for pollution control and energy conversion. TID-27164, Cornell Univ. Ithaca, N. V., 1977.

46. Jones D. D., Dale A. C., Nye J. C., Harrington R. B. Fiber wall reactor digestion of dairy cattle manure. ASAE Paper Nr. 77-4054.
47. Joos L., Rostek Mit neuen Gasgeräten Energie sparen. Gasverwendung 28 (1977), H. 9/10, S. 314 ff.
48. Jung W., Moritz W. W. Einsatz von Flüssigerdgas zur Ersatzgasversorgung. Gaswärme international 26 (1977), Nr. 8, S. 378 ff.
49. Keiser v. H. Planungsdaten für die Heutrocknung. RKL, Kiel, 1977.
50. Kirsch E. J., Sykes R. M. Anaerobic digestion in biological waste treatment. Progr. Ind. Microbiol. 9, 1971, S. 155—236.
51. Kolbusch P., Schäfer W. Beurteilung verschiedener biologisch-technischer Systeme zur Energie-Gewinnung, Dornier-System. Forschungsbericht Bundesministerium für Forschung und Technologie.
52. Konstandt H. G. Engineering, operation and economics of methane gas production. В кн.: Schlegel H. G., Barnea J.: Microbial energy conversion. Verlag E. Goltze KG, Göttingen, 1976, S. 379—398.
53. Konstandt H. G. Die technische Anwendung der Kontaktfäulung zur Behandlung eines organisch hochbelasteten Substrates am Beispiel von Mischgülle aus Massentierhaltungen, Industrieabwässer (Kommunalwirtschaft) 5 (1975), S. 13—16.
54. Kotze J. F., Thiel P. G., Hattingh W. H. J. Anaerobic digestion II. The characteristics and control of anaerobic digestion. Water research, 3(7), 1969, S. 459—493.
55. Koelliker J. K., Miner J. R. Desorption of ammonia from anaerobic lagoons. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 16 (1973), S. 148—151.
56. Kroeker E. J., Lapp H. M., Schulte D. D., Sparling A. B. Cold weather energy recovery from anaerobic digestion of swine manure. In: Energy, agriculture and waste management (Proceedings, Cornell Agricultural Waste Management Conf.), 1975, S. 337—352.
57. Liebmann H. Der neueste Stand der Kenntnisse über die Biologie der Methanbakterien. В кн.: Liebmann H.: Die Gewinnung und Verwertung von Methan aus Klärschlamm und Mist. Verlag R. Oldenbourg, München 1956, S. 9—22.
58. Ljunggren H., Petré F. Metangasframställningens Mikrobiologi. rapport fr. Institutionen för Mikrobiologi, Nr. 7, Uppsala, 1976.
59. Loehr R. C. Management of waste from agricultural industries. Problems, Processes and Approaches. New York, London, 1974.
60. Loehr R. C. Anaerobic treatment of wastes. Devel. Ind. Microbiol. 9, (1968), S. 160.
61. Loll U. Engineering, operation and economics of biodigestion. В кн.: Schlegel H. G., Barnea J.: Microbial Energy Conversion. Verlag E. Goltze KG, Göttingen, 1976, S. 361—378.
62. Loll U. Persönliche Mitteilung, 1978.
63. Maly J., Fadrus H. Influence of temperature on anaerobic digestion. J. Water Pollut. control Fed. 43 (1971), S. 641.
64. McCarty P. L., McKinney R. E. Salt toxicity in anaerobic digestion. J. Water Pollution Control Federation, 33 (1961), 4, S. 399—415.
65. McCarty P. L. Anaerobic waste treatment fundamentals. II. Environmental requirements and control. Public Works, 94, 1964, S. 123.
66. McCarty P. L. Anaerobic waste treatment fundamentals. III. Toxic materials and their control. Public Works, 95, 1964, S. 91.
67. McCarty P. L. Anaerobic waste treatment fundamentals. IV. Process design. Public Works, 95, 1974, S. 95.
68. McCarty P. L. Energetics and kinetics of anaerobic treatment. In: Anaerobic Biological Treatment Processes. Pine M. J., Polnald F. G. Adv. Chem. Series, 105, 1971, S. 91.
69. McDermott G. N., Moore W. A., Post M. A., Ettlinger M. B. Copper and anaerobic sludge digestion. Journal Water Pollut. Control Federation, 35 (1963), S. 644—662.
70. Meenaghan G. F., Wells D. M., Albin R. C., Grub W. Gas production from beef cattle wastes. ASAE 70—907. American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, Michigan, 1970.
71. Miner J. R., Smith R. J. (Herausgeber). Livestock waste management with pollution control. North Central Regional Research Publication 222. Midwest Plan Service Handbook MWPS-19. Midwest Plan Service, Iowa State University, 1975.
72. Miner J. R. (Herausgeber): Farm animal—waste management North Central Regional Research Publication 206, Iowa Agricultural Experiment Station Spec. Rep. 67. Ames. Iowa, 1971.
73. Mölbert H. Landtechnik 2—Veredelungswirtschaft. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart 1975.
74. Morris G. R., Jewell W. J., Casler G. L. Alternative animal waste anaerobic fermentation designs and their costs. In: Energy, Agriculture and Waste Management. Ann Arbor Science Publishers, Inc., 1975, S. 317—336.
75. Müller W., Strauch D. Ist es sinnvoll, aus hygienischen Gründen bei Faultürmen eine Verlängerung der Schlammfauzeiten zu fordern? Ges. Ing. 89 (1968), S. 118—121.
76. Nehring K. Futtermitteltabellenwerk 2. Aufl. Deutscher Landwirtschaftsverlag, Berlin 1972.
77. Neuling S. Der Wärmeaufwand für den Betrieb von Biogasanlagen. Agrartechnik 5 (1955), H. 6, S. 203—205.
78. Neuling S. Gestaltungsmöglichkeiten für den Bau von Landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Agrartechnik 7 (1957), H. 10, S. 467—471, 479.
79. Neuling S. Untersuchungen zur wirtschaftlichen Speicherung von Biogas. Agrartechnik 6 (1956), H. 2, S. 64 ff.
80. Noack W. Biogas in der Landwirtschaft. Verlag Elsner, Darmstadt 1955.
81. Orth H. W. Möglichkeiten des Einsatzes von Wärmepumpen in der Landwirtschaft. Institut für Landmaschinenforschung der FAL. Bericht 77/1, Braunschweig 1977.
82. Persson S. Progress report from the first year of operation of the Penn State Anaerobic Digester. Meeting of the North Atlantic Region of the ASAE at Rutgers University, New Jersey, 18, August 1976.
83. Pfeffer J. T., Kahn K. A. Microbial production of methane from municipal refuse. Biotechnology and Bioengineering, vol. XVIII, 1976, S. 1182.



84. Pigg D. L. Commercial size anaerobic digester performance with dairy manure. ASAE Paper 77—4055. American Society of Agricultural Engineers. St. Joseph, Michigan, 1977.
85. Poch M., Hänske L. Die biologisch-thermische Desinfektion von Gülle mit Hilfe der thermophilen Methangärung. Z. Gesundh. Hygiene, 14 (1968), S. 553—555.
86. Pöpel F. Das Wesen der Vergärung organischer Stoffe bei der Kompostierung. B. kn.: Kumpf W., Maas K., Straub H.: Müll- u. Abfallbeseitigung, Band 3, Kap. 5305. Erich Schmidt Verlag, Berlin 1964.
87. Poetsch W. Entwicklung und Erprobung einer handwerklich defertigten Biogas-Anlage aus Holz. Techn. Hochschule Hannover. Arbeitsber. 13, 1963.
88. Pohle J., Rostek H., Wilmers G. Gaswärmepumpen — Erste Ergebnisse einer Versuchsanlage. VDI-Bericht Nr. 259, 1976.
89. Reinhold F., Noack W. Laboratoriumsversuche über die Gasgewinnung aus landwirtschaftlichen Stoffen. B. kn.: Liebmann H.: Gewinnung und Verwertung von Methan aus Klärschlamm und Mist. Verlag R. Oldenbourg, München, 1956, S. 252—268.
90. Robertson A. M., Burnett G. A., Hobson P. N., Bousfield S., Summers R. Bioengineering Aspects of anaerobic digestion of piggery wastes. In: Managing Livestock Wastes (Proceedings, International Symposium), S. 544—548. American Society of Agricultural Engineers PROC—275, 1975.
91. Roediger H. Die anaerobe alkalische Schlammfäulung. — Wasser — Abwasser H. 1, Verlag R. Oldenbourg, München, 3. Auflage, 1967.
92. Roediger H., Konstandt H. G. Schlammbehandlung — Die zentrale Stellung der Schlammfäulung mit Faulgasverwertung in Bezug auf Abwasserreinigung und Schlammbehandlung. Schweiz. Maschinenmarkt, 47 (1972), S. 34—37.
93. Rosegger S. Energetische Fragen bei der biologischen Gaserzeugung in der Landwirtschaft. Agrartechnik 5 (1955), H. 10, S. 388—393.
94. Rosegger S., Neuling S. Wege zur Berechnung von landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Agrartechnik 7 (1957), H. 1, S. 14—17.
95. Rosegger S. Der Entwicklungsstand von Biogasanlagen und Perspektiven für die landwirtschaftliche Praxis. Agrartechnik 7 (1957), H. 12, S. 545 ff.
96. Rudolf F. Wärmepumpen — Einsatzmöglichkeit und Wirtschaftlichkeit. Tagungsbericht: Rationelle Energieverwendung im Wohnungsbau. Batelle-Institut Frankfurt, 3. Juni 1977.
97. Rudolph M. Unkonventionelle Arten der Kraft-Wärme-Kopplung. Energie 29 (1977), H. 11, S. 368 ff.
98. Sauerlandt W., Tietjen C. Humuswirtschaft des Ackerbaues. DLG-Verlag, Frankfurt/M., 1970.
99. Sauerlandt W., Groetzner E. Eigenschaften und Wirkungen der bei der biologischen Gasgewinnung aus Stallmist anfallenden organischen Dünger. B. kn.: Liebmann H.: Gewinnung und Verwertung von Methan aus Klärschlamm und Mist, Verlag R. Oldenbourg, München, 1956.
100. Sawyer C. N., Grumbling J. S. Fundamental consideration in high rate digestion. J. San. Eng. Div. Proc. American Society Agricultural Engin. 86, 1960, S. 49.
101. Scheffer F., Kemmler G. Biologische Gasgewinnung aus Stallmist. Mitt. d. DLG 78 (1953), H. 2, S. 27—29.
102. Schlegel H. G., Barnea J. Microbial energy conversion. Verlag Erich Goltze KG, Göttingen, 1976.
103. Schmidt F., Eggersglüss W. Die Bihugasanlage Allerhop. DEFU-Mitt. Heft 9, Verden, 1951.
104. Schmidt L. A., Lipper R. I. Swine wastes, characterization and anaerobic digestion. In: Animal waste management, Cornell University, Ithaca, New York, 1969, S. 50—57.
105. Schneider U. Energiewirtschaftliche Bedarfszahlen. Berichte über Landwirtschaft Nr. 73, Teil II (1962).
106. Schneiderhöhn R., Schneider U. KTBL-Datensammlung für die Kalkulation der Kosten und des Arbeitszeitbedarfs im Haushalt. Landwirtschaftsverlag Hiltrup 1975.
107. Schürmer E. Preis- und Kostenkalkulation für Heizanlagen im Gartenbau. KTBL-Berichte über Landtechnik 144, Landwirtschaftsverlag, Hiltrup 1971.
108. Seifert A. Biogas als Kraftstoff für Motoren und Ackerschlepper. Landtechnik 10 (1955), H. 2, S. 29 ff.
109. Smith R. J., Fehr R. L., Miranowski J. A., Pidgeon E. R. The role of an anaerobic digester on a typical central-Iowa farm. In: Food, fertilizer and agricultural residues (Proceedings, Cornell Agricultural Waste Management Conf., 1977.)
110. Smith L. W., Goering H. K., Gordon C. H. Influence of chemical treatments upon digestibility of ruminant feces. In: Animal Waste Management, Cornell University, Ithaca, New York, 1969, S. 88—104.
111. Smith R. J., Hein M. E., Greiner T. H. Experimental methane production from animal excreta. Journal Paper No. J-8917, of the Iowa Agr. and Home Economics Exp. Station, Ames, Iowa, 1977.
112. Smith R. J., Miner J. R. Livestock waste management with pollution control. Midwest Plan Service. Iowa State Univ. Ames, Iowa, 1975.
113. Somer K.-L. Kühlen und Heizen mit direktgasbeheizten Absorptionsgeräten. Gasanwendung 28 (1977), S. 186 ff.
114. Somer K.-L. Wärmeezeuger der Zukunft — die direktgasbeheizte Absorptionswärmepumpe als Alternative. Gasverwendung 28 (1977), H. 9/10, S. 341 ff.
115. Strauch D. Hygienische Probleme bei der Gewinnung, Behandlung und Verwertung tierischer Exkremente. In: Abfälle aus der Tierhaltung. Kap. F, Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, 1977, S. 246—276.
116. Stauss W. Der heutige Stand der Biogasgewinnung aus landwirtschaftlichen organischen Stoffen. B. kn.: Liebmann H.: Gewinnung und Verwertung von Methan aus Klärschlamm und Mist, Verlag R. Oldenbourg, München, 1956, S. 216—251.
117. Summers R., Bousfield S. Practical aspects of anaerobic digestion. Process Biochemistry, Juni 1976.
118. Tabasaran O. Über Maßnahmen zur Beschleunigung der Schlammfäulung. 33. Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft, München, 1967.

119. Taiganides E. P., Hazen T. E., Baumann E. R., Johnson H. P. Properties and pumping characteristics of hog wastes. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers 7 (1964), S. 123, 124, 127 u 129.
120. Theune H. H. Pers. Mitt., Institut für Grünlandwirtschaft, Futterbau u. Futterkonservierung der FAL, Braunschweig, 1978.
121. Tietjen C. From biodung to biogas—historical review of European experience. B. K. Jewell W. J. (Herausgeber): Energy agriculture and waste management; Ann Arbor Sci. Publishers, Inc., Ann Arbor, Michigan, 1975.
122. Tietjen C. Pers. Mitteilung, 1977.
123. Tietjen C. Bilanzuntersuchungen bei Stallmistaufbereitung in Biogasanlagen. Pflanzenern., Düngung, Bodenkunde 77 (1957), S. 1988. ff.
124. Tschierschke M. Die Erzeugung von Biogas im landwirtschaftlichen Betrieb. Archiv für Landtechnik 3 (1961—62), S. 243—277.
125. Varel V. H., Isaacson H. R., Bryant M. P. Thermophilic methane production from cattle waste. Applied and Environmental Microbiology 33 (1977), S. 298—307.
126. Velsen van A. F. M. Anaerobic digestion of piggery waste. I. The influence of detention time and manure concentration. Neth. J. agric. Sci. 25 (1977), S. 151—169.
127. Vielhaber K. VDI-Statusbericht Wärmepumpe. Düsseldorf, VDI-Verlag 1976.
128. Vielhaber K. Wärmepumpen mit Gas-Zusatzheizungen. Flüssiggas-Dienst (1977), H. 4, S. 9 ff.
129. Vogt H. Pers. Mitt., Institut für Kleintierzucht der FAL, Celle, 1978.
130. Waart de J., v. d. Most M. M., Knoi W. Production of energy and nonoffensive smelling sludge from liquid pig manure. Abstracts Fifth Intern. Fermentation Symposium, Berlin, 1976.
131. Weber F. Neue Erkenntnisse in der Düngerwirtschaft. Eigenverlag F. Weber, 7311 Bissingen, 1977.
132. Wickermann E. Die Kalkulation der Heizmaterialkosten für Gewächshäuser... Forschungsberichte aus Institut für gärtnerische Betriebslehre und Marktforschung. TU-Hannover. Nr. 4, 1969.
133. AEG-Hilfsbuch, Handbuch der Elektrotechnik. X. Auflage, AEG-Telefunken. 1967.
134. ATV-Abwassertechnik, Bd. II. Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, München, 1969.
135. DVGW-Arbeitsblatt G. 260. Technische Regeln für die Gasbeschaffenheit.
136. Energie Gas—allgemeine Grundlagen (V), Gasverwendung 28 (1977), H. 7/8, S. 283.
137. Familie und wohnen. Schriftenreihe des Bundesministers für Jugend, Familie und Gesundheit, Band 20, Verlag Kohlhammer, Stuttgart, 1976.
138. Fiat Auto Group—Totem, Total energy module, September 1977.
139. Gaswärmepumpe für Heizung und Warmwasser. Ruhrgas-AG, Essen 1976.
140. Hütte, Taschenbuch des Ingenieurs. Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin.
141. Landwirtschaftliche Trocknungswerke in der Bundesrepublik. Der Kartoffelbau 23 (1972), H. 12, S. 302.
142. Merkblätter gefährliche Arbeitsstoffe, Blatt Nr. M 09 Methan, Blatt Nr. S. 14, (Schwefelwasserstoff), Blatt Nr. K 19, (Kohlendioxid).
143. Metangas ur gödsel, framställning och användning. Jordbruks- tekniska Institutet-Rapport 18, Uppsala, 1976.
144. Report of the Preparatory Mission on Bio-Gas Technology and Utilisation. Economic and Social Commission for Asia and the Pacific, Manila/Bangkok 1975.
145. Sicherheitsregeln für Abwasserbehandlungsanlagen—Bau und Ausrüstung. GUV 17.5.1969. Bundesarbeitsgemeinschaft der gemeindlichen Unfallversicherungsträger.
146. Statistisches Jahrbuch über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten der Bundesrepublik Deutschland 1976. Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster-Hiltrup, 1976.
147. Statistisches Jahrbuch über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten der Bundesrepublik Deutschland 1977. Landwirtschaftsverlag GmbH. Münster-Hiltrup, 1977.
148. Unfallverhütungsvorschrift der land und forstwirtschaftlichen Berufsgenossenschaften.
149. Unfallverhütungsvorschrift «Druckbehälter» (VBG 17) des Hauptverbandes der gewerblichen Berufsgenossenschaften.
150. VDI-Richtlinie 2067, Blatt 2, Jan. 1974. Wirtschaftlichkeitsberechnungen von Wärmeverbrauchsanlagen, betriebstechnische und wirtschaftliche Grundlagen.

## СОДЕРЖАНИЕ

|                                           |   |
|-------------------------------------------|---|
| Предисловие к русскому изданию . . . . .  | 3 |
| Предисловие к немецкому изданию . . . . . | 6 |
| Введение . . . . .                        | 9 |

### Часть I

#### ТЕХНОЛОГИЯ МЕТАНОВОГО БРОЖЕНИЯ 13

|                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Основные положения . . . . .                                                               | 13 |
| 1.1. Особенности процесса . . . . .                                                           | 13 |
| 1.1.1. Процессы биохимических превращений [15, 17, 18, 58, 60, 91] . . . . .                  | 13 |
| 1.1.2. Факторы, влияющие на процесс брожения . . . . .                                        | 14 |
| Температура [16, 19, 22, 27, 63, 91, 125] . . . . .                                           | 14 |
| Содержание кислот, pH, буферные свойства (щелочность) [50, 54, 58, 71] . . . . .              | 15 |
| Ингибиторы [45, 58, 59, 64, 66, 71, 134] . . . . .                                            | 16 |
| Питательная среда [17, 65, 86, 91] . . . . .                                                  | 16 |
| Состав газа [17, 65, 86, 91] . . . . .                                                        | 17 |
| Концентрация твердых частиц [45, 58, 124, 143] . . . . .                                      | 17 |
| 1.2. Влияние исходного материала на выход газа . . . . .                                      | 18 |
| 1.2.1. Состав исходного материала . . . . .                                                   | 18 |
| 1.2.2. Размеры твердых частиц [89, 116, 124] . . . . .                                        | 20 |
| 1.2.3. Максимальный выход газа . . . . .                                                      | 21 |
| 1.3. Особенности технологии . . . . .                                                         | 22 |
| 1.3.1. Загрузка рабочего пространства . . . . .                                               | 23 |
| 1.3.2. Технологическое время брожения (время пребывания массы в реакторе [89, 100]) . . . . . | 24 |
| 1.3.3. Интенсивность перемешивания . . . . .                                                  | 25 |
| 2. Продукты сбраживания . . . . .                                                             | 26 |
| 2.1. Газ . . . . .                                                                            | 26 |
| 2.1.1. Состав газа . . . . .                                                                  | 26 |
| 2.1.2. Свойства газа . . . . .                                                                | 26 |
| 2.2. Перебродивший субстрат (шлам) . . . . .                                                  | 27 |
| 2.2.1. Состав шлама [99, 101, 123] . . . . .                                                  | 27 |
| 2.2.2. Загрязнение окружающей среды . . . . .                                                 | 27 |
| Запах [126, 130] . . . . .                                                                    | 27 |
| Возбудители болезней [2, 62, 75, 85, 115] . . . . .                                           | 27 |
| 3. Технологические схемы биогазовых установок . . . . .                                       | 28 |
| 3.1. Системы, применяемые в производстве (рис. 7) . . . . .                                   | 28 |
| 3.2. Компоненты установки . . . . .                                                           | 31 |
| 3.2.1. Реактор . . . . .                                                                      | 31 |

|                                                         |    |
|---------------------------------------------------------|----|
| 3.2.2. Нагревательные устройства . . . . .              | 36 |
| Подогрев в рабочем пространстве . . . . .               | 37 |
| Подогрев подаваемого в реактор субстрата . . . . .      | 37 |
| 3.2.3. Устройства для перемешивания субстрата . . . . . | 38 |
| Механические перемешивающие устройства . . . . .        | 38 |
| Гидравлические перемешивающие системы . . . . .         | 39 |
| Перемешивание с помощью газа . . . . .                  | 39 |
| 4. Потребность в энергии . . . . .                      | 40 |
| 4.1. Теплота . . . . .                                  | 40 |
| 4.1.1. Подогрев сбраживаемой массы . . . . .            | 40 |
| 4.1.2. Компенсация тепловых потерь . . . . .            | 40 |
| 4.2. Механическая энергия . . . . .                     | 41 |
| 4.2.1. Перемешивание . . . . .                          | 41 |
| 4.2.2. Насосы . . . . .                                 | 42 |
| 4.3. Покрытие потребности в энергии . . . . .           | 42 |
| 4.3.1. Газ . . . . .                                    | 42 |
| 4.3.2. Вторичное использование теплоты . . . . .        | 43 |
| 4.3.3. Прочие источники энергии . . . . .               | 45 |
| Теплота животноводческих помещений . . . . .            | 45 |
| Теплота окисления . . . . .                             | 45 |
| Солнечная энергия . . . . .                             | 46 |

### Часть II

#### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БИОГАЗА 47

|                                                                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5. Аккумулирование газа . . . . .                                                                                 | 47 |
| 5.1. Технические возможности . . . . .                                                                            | 47 |
| Подземное газохранилище пористого типа . . . . .                                                                  | 50 |
| Подземное газохранилище кавернозного типа . . . . .                                                               | 50 |
| Газгольдер для сжиженного природного газа . . . . .                                                               | 50 |
| Газгольдер абсорбционного типа . . . . .                                                                          | 50 |
| Газгольдер высокого давления . . . . .                                                                            | 53 |
| Мокрые газгольдеры низкого давления колокольного типа . . . . .                                                   | 53 |
| Сухой газгольдер низкого давления . . . . .                                                                       | 54 |
| Оболочковый газгольдер низкого давления . . . . .                                                                 | 55 |
| Газгольдер-баллон низкого давления . . . . .                                                                      | 55 |
| 5.2. Правовые вопросы . . . . .                                                                                   | 58 |
| Опасность со стороны газа (газовый состав) . . . . .                                                              | 59 |
| Опасность взрыва газгольдера (в результате избыточного давления) . . . . .                                        | 59 |
| 6. Подготовка биогаза к использованию . . . . .                                                                   | 63 |
| Обессеривание . . . . .                                                                                           | 64 |
| Абсорбционная очистка от CO <sub>2</sub> . . . . .                                                                | 65 |
| Компримирование биогаза . . . . .                                                                                 | 65 |
| 7. Использование биогаза . . . . .                                                                                | 67 |
| 7.1. Используемые аппаратура и машины . . . . .                                                                   | 69 |
| 7.2. Объединенная выработка тепловой и механической энергии . . . . .                                             | 79 |
| Объединенная выработка тепловой и механической энергии в установках для привода вентиляторов . . . . .            | 80 |
| Объединенная выработка тепловой, и механической энергии при использовании тепловых насосов . . . . .              | 82 |
| Объединенная выработка тепловой и механической энергии при производстве электроэнергии . . . . .                  | 88 |
| 8. Потребности сельскохозяйственных предприятий в энергии, которые могут быть покрыты с помощью биогаза . . . . . | 91 |

|                                                 |     |
|-------------------------------------------------|-----|
| 8.1. Крестьянские хозяйства ФРГ                 | 92  |
| 8.2. Растениеводство                            | 97  |
| 8.3. Животноводство                             | 103 |
| 8.4. Модельные хозяйства                        | 105 |
| 9. Использование биошлама                       | 108 |
| 10. Экономичность сельских биогазовых установок | 111 |
| Итоги и перспективы                             | 118 |
| Приложения                                      | 123 |
| Список литературы                               | 137 |

В. Баадер, Е. Доне, М. Бренндерфер

# **БИОГАЗ. ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА.**

Заведующий редакцией *А. Т. Докторов*

Редактор *Л. И. Мотрий*

Художник *С. Н. Томилин*

Художественный редактор *А. И. Бершачевская*

Технические редакторы *Н. В. Суржева, Н. В. Новикова*

Корректор *А. И. Пригарина*

**ИБ № 2821**

Сдано в набор 02.12.81. Подписано к печати 25.03.82. Формат 84×108<sup>1</sup>/<sub>32</sub>.  
Бумага тип. № 2. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 7,98.  
Усл. кр.-отт. 8,3. Уч.-изд. л. 8,48. Изд. № 141. Тираж 1400 экз. Заказ № 8706.  
Цена 60 коп.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Колос», 107807, ГСП;  
Москва, Б-53, ул. Садовая-Спаская, 18.

Областная типография управления издательств, полиграфии и книжной  
торговли Ивановского облисполкома. 153628, г. Иваново, ул. Типографская, 6.